Liebe Leserinnen, liebe Leser!

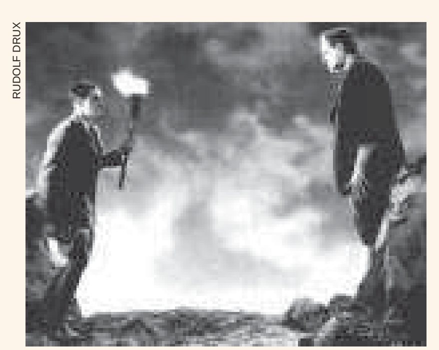


Reinhard Breuer
Chefredakteur

Zu den großen Welträtseln, die der Forschung derzeit noch widerstehen, zählen die Entstehung des Universums, der Ursprung des Lebens auf der Erde sowie das Auftauchen des menschlichen Bewusstseins. Zu diesem Thema gab es in jüngster Zeit immerhin einige interessante neue Erkenntnisse. Davon zeugen mehrere Spektrum-Artikel: „Moleküle aus dem All“ (10/99), „Urzeugung aus Kometenstaub?“ (5/00) und „Kosmischer Staub“ (2/01).

Jahrzehntelang gingen alle Versuche zur Rekonstruktion der Lebensentstehung von Luft und Wasser aus – und übersahen den dritten Urstoff auf unserem Planeten: Erde. Deshalb war es eine kleine Sensation, als der deutsche Patentanwalt und Chemiker Günter Wächtershäuser 1988 erstmals ein Mineral ins Spiel brachte: den Pyrit. Seither hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass Gesteine – scheinbar der Inbegriff des Leblosen – sehr wohl in der Lage waren, entscheidende Hilfestellung bei der Entwicklung sich selbst reproduzierender chemischer Systeme zu geben – sei es als Energiequellen, Katalysatoren oder Refugien. In diesem Sinne zeigt der amerikanische Geologe Robert M. Hazen in seinem Beitrag ab Seite 34 auf, dass die Urzeugung in doppeltem Wortsinn „steinig“ war: für das Leben wie auch für die Forscher.

Spätestens seit die Reproduktionsmediziner Panos Zavos und Severino Antinori angekündigt haben, einen Menschen zu klonen, sind Horrorszenarien nach Art des Dr. Frankenstein wieder lebendig geworden. Offenbar wurzelt der Mythos vom künstlich geschaffenen Menschen tief in unserer kollektiven Psyche, verkörpert vom aus Lehm geformten Golem über Mary Shelleys schauerliches Monster bis hin zum japanischen Computer-Robby und den Menschenkopien als wandelndem Ersatzteillager.



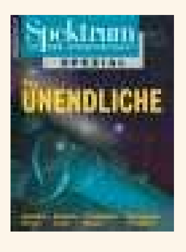
RUDOLF DRUX

Dr. Frankenstein mit seinem Geschöpf

Die Literatur hat den Topos über die Jahrhunderte fortgesponnen und dem *Homo sapiens* immer wieder artifizielle Ebenbilder beigestellt – ob als Automat, Monster oder Homunkulus. Mal eilte die Fantasie dem Stand der Technik voraus, mal wurde er direkter Quell der Inspiration. Rudolf Drux, Literaturwissenschaftler an der Universität zu Köln, hat für uns die Genealogie der Kunstmenschen aufgezeichnet (Seite 68).

Herzlich Ihr





Wollten Sie schon immer alles über das Unendliche erfahren und haben sich nur nicht zu fragen gewagt? Unser Sonderheft „Das Unendliche“, das seit kurzem an den Kiosken liegt, führt Sie ein in die Geheimnisse unendlich großer, kleiner sowie komplexer Dinge und Sachverhalte.

INHALT

TITELBILD:

War Pyrit an der Urzeugung beteiligt? Das Mineral enthält jedenfalls eine ähnliche Eisen-Schwefel-Gruppe wie manche Enzyme, etwa die hier gezeigte Aconitase.

Enzym: Swiss Protein DB; Foto: R. Lewis; Grafik: Th. Braun

FORSCHUNG AKTUELL

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL

TITELTHEMA: URZEUGUNG

Der steinige Weg zum Leben

Seite 34

Von Robert M. Hazen

Außer Luft und Wasser war Gestein der einzige Rohstoff auf der Früherde. Offenbar haben bestimmte Mineralien bei der Entstehung irdischen Lebens eine entscheidende Rolle gespielt.





INDUS-ARCHÄOLOGIE

Fisch für Harappa

Seite 28

Von Dietrich Sahrhage

Knochenfunde und Netzreste erzählen vom Fischfang in der ansonsten noch wenig erforschten Harappa-Kultur des antiken Pakistan und Indien.

INTERFEROMETRIE

Ein schärferer Blick auf die Sterne

Seite 42

Von Arsen R. Hajian und J. Thomas Armstrong

Eine neue Generation optischer Interferometer vermag weit feinere Einzelheiten auf Himmelskörpern zu entdecken als selbst das Hubble-Weltraumteleskop. Astronomen können damit die Oberflächen ferner Sterne kartieren und selbst einen Astronauten auf dem Mond erkennen.

GENETIK

Das kleine Chromosom der Männlichkeit

Seite 60

Von Karin Jegalian und Bruce T. Lahn

Einst glichen die beiden Geschlechts-chromosomen X und Y einander wie Zwillinge. Dann lenkte eine zufällige Veränderung das Y auf seltsame Wege. Heute bestimmt es, wie sehr der Mann ein Mann ist.



TEKTONIK

Die bewegte Geschichte des Nordatlantiks

Seite 50

Von Alexander Braun und Gabriele Marquardt

Die Trennung von Nordamerika und Europa vor 120 bis 40 Millionen Jahren war ein überraschend komplizierter Vorgang. Erst jetzt enthüllen Satelliten-Messungen und die seismische „Durchleuchtung" des Erdmantels den Vorgang in seiner ganzen Dramatik.





FRANKENSTEIN-KOMPLEX

Künstliche Menschen

Seite 68

Von Rudolf Drux

Automaten, Roboter, Homunkuli: Das Wechselspiel von wissenschaftlichem Fortschritt und seiner Entsprechung in der Literatur spiegelt sich wider in der Geschichte des „künstlichen Menschen". Oftmals waren die Schriftsteller auf der technischen Höhe ihrer Zeit – mitunter nahmen sie reale Entwicklungen sogar vorweg.

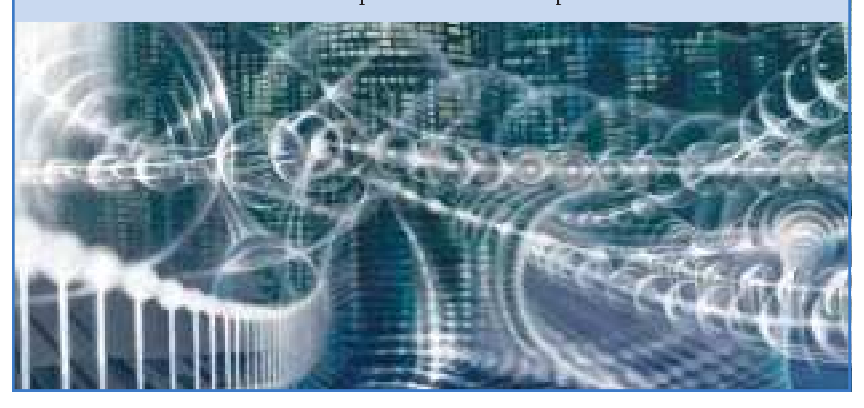
Spektrum-Report:

Daten-Sintflut im Glasfasernetz

Seite 78

Die nächste Daten-Sintflut kommt bestimmt, davon sind Internet-Professionals überzeugt. Um die erforderlichen Kapazitäten zu schaffen, werden bestehende Glasfasernetze optimiert und neuartige photonische Komponenten entwickelt. Das Ziel: das rein optische Netzwerk.

Inhalt:
Mehr Licht • Lichtleitfasern • Optische Schalter • Optische Router



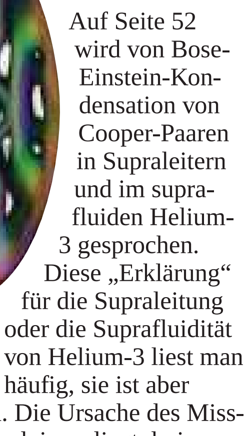
FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Das kälteste Gas im Universum
Februar 2001



D. FEDER, P. KETCHAM (NIST)

Bose-Einstein-Kondensat

Auf Seite 52 wird von Bose-Einstein-Kondensation von Cooper-Paaren in Supraleitern und im suprafluiden Helium-3 gesprochen. Diese „Erklärung" für die Supraleitung oder die Suprafluidität von Helium-3 liest man häufig, sie ist aber falsch. Die Ursache des Missverständnisses liegt darin, dass diese Cooper-Paare keine individuellen Bose-Teilchen sind, sondern einen paar-korrelierten Zustand von Fermi-Teilchen bilden. Der Grundzustand der Supraleiter und der des suprafluiden Helium-3, der so genannte BCS-Grundzustand, ist verschieden von dem eines Bose-Einstein-Kondensats.

Trotzdem gibt es viele Gemeinsamkeiten zwischen den Supraleitern und dem Helium-3 einerseits und den Bose-Einstein-Kondensaten andererseits, wie z. B. die schönen Fotos der Wirbel-Zustände zeigen. In beiden Systemen haben wir es mit einer makroskopischen quantenmechanischen Wellenfunktion zu tun.

Prof. Wilfried Schoepe, Regensburg

Fersenstoß und Abrollhilfe
Technoskop – Februar 2001

Der *Tractus tibialis*, den die Autorin selbst wenige Zeilen später korrekt als iliotibiales Band bezeichnet, heißt dementsprechend natürlich *Tractus iliotibialis*. Der Name erklärt sich aus dem Verlauf des aponeurotischen Verstärkungszuges von der Gegend des Darmbeins (*Os ilii*) zum Schienbein (*Tibia*). Konkreter ist er die Sehnenplatte des großen Gesäßmuskels und eines kleineren Muskels des Oberschenkels, die nach ihrem Verlauf über den seitlichen Oberschenkel unter dem Knie ansetzt. Sinn dieser Aponeurose ist es, die seitliche Biegebeanspruchung des Oberschenkelknochens nach dem Zuggurtungsprinzip zu reduzieren, wodurch sich die Dehnung bei übermäßiger Supination im unteren Sprunggelenk erklärt.

Tobias Pfaffendorf, München



Schluss mit dem Versteckspiel des Tuberkulose-Erregers
Monatsspektrum – Februar 2001

Das Foto zeigt ein angereichertes Ziehl-Neelsen-Präparat eines „positiven" Sputums und keinesfalls ein „ausgestrichenes Blutserum". Der Nachweis von *Mycobacterium tuberculosis* im Blut gelingt mikroskopisch nie. Auch der kulturelle Nachweis ist problematisch und aufwändig.

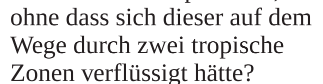
Dr. Rüdiger Uhlemann, Waldenburg

Der Ursprung der modernen Küche – Februar 2001

Wer hat im 17. Jahrhundert Schaumwein zu trinken bekommen? Weder Elisabeth I. noch die Stuart-Könige, weder Richelieu noch Mazarin, vielleicht gegen Ende des Jahrhunderts Ludwig XIV., denn Schaumwein ist im Jahr 1695 erfunden worden.

Wenn vom 16. Jahrhundert behauptet wird, alle Hauptgerichte enthielten Zucker, frage ich: Wo sollte der denn hergekommen sein? Um das Mittelmeer herum gab es etwas, nämlich aus Marokko. Pisa tauschte ihn 1:1 gegen Carrara-Marmor. Deswegen dürfte er auch Karl V. und Philipp II. in Spanien bekannt gewesen sein. Aber damit haben Martin Luther, Friedrich der Weise, Moritz von Sachsen oder Kaiser Ferdinand I. noch lange keinen Zucker gehabt. Engländer, Franzosen und Holländer mögen davon etwas aus Indien mitgebracht haben. Aber wie konnte man damals kristallinen Zucker mit Segelschiffen mehrere Monate lang von Indien oder Indonesien um das Kap der Guten Hoffnung nach Europa transportieren, ohne dass sich dieser auf dem Wege durch zwei tropische Zonen verflüssigt hätte?

HEIDI NOLAND



Schaumwein gibt es seit 1695.

Dr. Hartmut Johannes, Overijse, Belgien

Heiße Strahlung eines Schneeballs
Monatsspektrum – März 2001

Der Röntgensatellit ROSAT ist ein Projekt des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Garching mit US-amerikanischer und britischer Beteiligung. Mit der ESA hat ROSAT nicht das Geringste zu tun.

Dr. Roland Egger, Olching

Das unterschätzte Gift
April 2001

Das Dreiecksmodell „Im Teufelskreis der Alkohol-Abhängigkeit", auf Seite 64 abgebildet und auf Seite 66 zitiert, wurde bereits im Jahr 1968 und nicht erst 1998 entwickelt.

Prof. Dr. Feuerlein, München

Gigantischer Strahlungsblitz in Rekorddistanz – April 2001

Der Monddurchmesser beträgt je nach Abstand ca. 1/2 Grad, also 30 Bogenminuten bzw. 1800 Bogensekunden.
6 Bogensekunden sind also nicht 1/3, sondern 1/300 des Monddurchmessers.

Hans-Ludwig Reischmann, Überlingen

ATP als Schmerzsignal – April 2001

Ausgangsverbindung für die DNA-Synthese sind nicht ATP, GTP, CTP, TTP, sondern die entsprechenden Desoxynukleotide dATP, dGTP, dCTP, dTTP. Am C2 des Zuckers (Desoxyribose) fehlt jeweils das –OH und ist durch einen Wasserstoff substituiert. Daher auch die Bezeichnung *desoxyribonucleic acid*, DNA. Die RNA-Synthese geht bekanntlich von ATP, GTP, CTP und UTP aus. Letzteres tritt an Stelle von TTP.

Dr. Hans von Besser, Würzburg

Zeit der Wunder – Nachgehakt März 2001

Heute kann der Verbraucher aus einer noch nie da gewesenen Vielfalt von Produkten auswählen und gibt dafür relativ abnehmende Anteile seines verfügbaren Einkommens aus. Parallel zu dieser Entwicklung sind die Hygiene-Anforderungen an die Produktion der Nahrungsmittelrohstoffe und deren Verarbeitung immer höher geschraubt worden.

Angesichts dieser Situation können von „Nahrungs-GAU" nur Leute reden, die ein völlig verzerrtes Bild von Bauern und der Landwirtschaft haben. Sie ist heute ein Sektor in einer modernen Volkswirtschaft. Auch landwirtschaftliche Unternehmen müssen rationalisieren, technischen Fortschritt umsetzen und wachsen – oder dem Wettbewerb das Feld überlassen.

Jürgen Hansen, Westerholz

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels,
Postfach 104840,
69038 Heidelberg
E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Ab wann haben Embryonen Menschenwürde? – März 2001

Widerspruch in der Rechtsprechung

Ab wann haben Embryonen Menschenwürde? Das ist die Kardinalfrage in der Diskussion um die Ver-„wertung“ von Embryonen, weil die Würde des Menschen durch Art. 1 GG geschützt ist. Man kann auch fragen: „Ab wann ist ein Embryo ein Mensch?“ Die Antwort, in den ersten zwölf Wochen nach der Insemination sei ein Schwangerschaftsabbruch nach § 218a StGB nicht rechtswidrig und folglich eine Würde des Embryos nicht vorhanden und somit der Embryo kein Mensch, ist richtig.

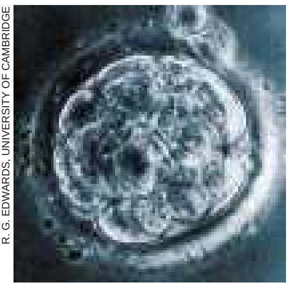
Dieser Sachverhalt wurde noch nicht durch eine Gesetzesänderung im BGB § 1923 (2) berücksichtigt. Dort heißt es: „Wer zur Zeit des Erbfalles noch nicht lebte, aber bereits erzeugt war, gilt als vor dem Erbfall geboren“, d. h. der Embryo wird unmittelbar nach der Insemination für würdig befunden, ein Erbe anzutreten.

Am wenigsten wegen dieser Inkonsequenz, sondern wegen moralischer Bedenken gegen Eingriffe in zumeist als „gottgewollt“ empfundene Schicksale potenzieller Menschen wird die Diskussion zwischen diesen Moralisten und solchen, die eine andere Moral haben, immer schwieriger.

Dr. Ulrich Feldmann, Wolfenbüttel

Geistig-ethisch oder biologisch-materialistisch definieren?

In der Diskussion zwischen Genetikern und Gen-Ethikern um den Embryonenschutz haben sich die Positionen von Natur- und Geisteswissenschaften um 180 Grad gedreht.



R. G. EDWARDS, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Zellen im Morula-Stadium

Bisher waren die Naturwissenschaften von einem Denkansatz materialistischer Untersuchungsobjekte ausgegangen, für die Geisteswissenschaften stand dagegen der menschliche Geist im Zentrum ihrer Interessen.

Doch nun setzen die Gen-Ethiker eine befruchtete Eizelle und menschliche Embryonen im Morula-Stadium mit menschlichem Leben gleich, obwohl die einzige menschliche Eigenschaft dieser Zelle oder dieses Zellhaufens in den 46 Chromosomen und den von ihnen codierten Proteinen besteht. Damit definieren sie menschliches Leben nicht mehr geistig und ethisch, sondern rein biologisch-materialistisch und führen damit jede Ethik ad absurdum.

Umgekehrt beginnen Menschsein und Menschenwürde für Genetiker erst mit dem tatsächlichen Erwachen des menschlichen Geistes. Das mag die späte Embryonalzeit sein, die Geburt oder (wie in Korea) der erste Geburtstag eines Kindes, aber gewiss nicht die befruchtete Eizelle.

Prof. Dr. Dr. H. E. Müller, Braunschweig

Erratum
Spuren des Lebens
April 2001

Das auf der Seite 86 abgebildete Präparat stammt nicht von einer Eiche, sondern vom Stamm eines Rhododendrons aus der Krummholzzone oberhalb der alpinen Waldgrenze. Die Probe wurde mit einer Etzold-Lösung gefärbt und mit einem Mikrotom geschnitten. Das abgebildete Stück hat einen Durchmesser von 12 Millimetern und immerhin ein Alter von mindestens 42 Jahren, da vermutlich nur in guten Jahren ein Ring hinzu kam.

Die Redaktion

Nur das Forschungsziel im Auge

Eine unbefruchtete Eizelle hat eine Restlebenserwartung von einigen Stunden, Spermien von einigen Tagen, eine befruchtete Eizelle hingegen schlagartig von einigen Jahren. Was da geschieht, nennen wir Zeugung eines Menschen. Herrn Tragesers Kommentar beschränkt sich dann lediglich auf die Güterabwägung zwischen verschiedenen Entwicklungsstadien.

Eine ähnliche Situation hatten wir vor etwa fünfzig Jahren. Damals gab es ein Wettrennen zwischen Computer-Wissenschaftlern und Mathematikern. Es ging um die theoretische Verifikation, ob eine Wasserstoff-Bombe funktionieren kann oder nicht. Typischerweise war keiner der Experten in der Lage, von seinem Forschungsziel zu abstrahieren.

Es brauchte eine breite Öffentlichkeit, die sich gegen die Entwicklung von Nuklearwaffen stellte. Wissenschaftler versteckten sich immer hinter der guten Absicht, für den Frieden zu arbeiten.

B. Gustavs, Staefa, Schweiz

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 504-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Hilde Fischer, Dr. Gunnar Radons, Peter Schütz, Dr. Michael Springer
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758; Verkaufsberatung: Sabine Ebert, Tel. (06221) 504-749, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Michael Albrecht, Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

BOTANIK

Genetischer Steckbrief eines Pflanzenschädlings

Brasilianische Forscher haben jetzt das Genom von *Xylella fastidiosa* entziffert – einem Bakterium, das große Schäden in Orangenplantagen anrichtet. Die Genkarte des Krankheitserregers bietet überraschende Einblicke in seinen Stoffwechsel.

Von Wolfgang Hachtel und Silvia Berger

Die Genkarte des Menschen ist fertig, diejenige seines Darmbewohners *Escherichia coli* seit längerem bekannt. Scheint es da überhaupt noch erwähnenswert, dass mit *Xylella fastidiosa* nun erstmals auch das Erbgut eines Bakteriums entziffert wurde, das Pflanzen befällt? Zweifellos – denn in den vergangenen Jahren entwickelte sich der Mikroorganismus zu einer ernsten Bedrohung für Orangenplantagen, der wichtigsten Einkommensquelle des brasilianischen Bundesstaates São Paulo, wo er jährlich mehrere Millionen US-Dollar Verluste verursacht. Durch systematischen Vergleich seines Genoms mit denjenigen von Bakterien, die Menschen oder Tiere befallen, lassen sich Besonderheiten im Stoffwechsel aufspüren, die als Achillesfersen zur Bekämpfung solcher Pflanzenschädlinge dienen oder Ansatzpunkte für die Züchtung von resistenten Zitrusfrüchten bieten könnten.

ELLIOT W. KITAJIMA, UNIVERSITÄT SAO PAULO

Das Bakterium *Xylella fastidiosa* befällt Leitgewebe von Zitrusbäumen.

Das Bakterium *X. fastidiosa* ist weltweit verbreitet; einige Stämme schädigen Weinstöcke, Kaffeesträucher, Ulmen, Mandel- oder Pflaumenbäume. Im Jahre 1987 wurde erstmals berichtet, dass der Mikroorganismus auch Orangenbäume befällt: Mit einer zuckrigen Masse (aus Polysacchariden) kleben sich die Bakterienkolonien an die Gefäßwand der Leitbündel, die das Wasser aus den Wurzeln in die Blätter transportieren, und erzeugen dadurch die schwer zu bekämpfende *Citrus Variegated Chlorosis* (CVC). Bei dieser Krankheit verlieren die Blätter Chlorophyll und erscheinen gelb-grün gescheckt; die Früchte bleiben klein und hart, sodass sie ungenießbar sind.

Durch die Verwendung infizierter Zweige als Pfropfreiser gelangte der Erreger in fast alle Orangenplantagen Brasiliens und Argentiniens. Seine Ausbreitung ließ sich bisher nur durch die Anlage neuer Haine mit bakterienfreien Pfropfreisern eindämmen. Zudem versuchen die Plantagenbesitzer, die Zwergzikaden, die als natürliche Überträger der Krankheit fungieren, chemisch zu bekämpfen. Die Insekten stechen – ähnlich wie Blattläuse – den Pflanzenstängel an und saugen den Saft aus den Leitungsbahnen. Dabei gelangen die Bakterien aus ihrem Vorderdarm in das Wasserleitungssystem der Pflanze. Wie sie sich dort ausbreiten, weiß man noch nicht. Auch der eigentliche Schädigungsmechanismus des Krankheitserregers ist bislang nicht eindeutig geklärt; vermutlich wird die Wasserversorgung der Pflanze beeinträchtigt.

Um Informationen zur besseren Bekämpfung des Schädlings zu erhalten, identifizierten Wissenschaftler der Organisation für Nucleotid-Sequenzierung und -Analyse (ONSA) in São Paulo jetzt in einem Mammutprojekt die 2,7 Millionen Basenpaare („Buchstaben“) im Erbgut von *X. fastidiosa* und verglichen sie mit dem bereits bekannten genetischen Text anderer Bakterien. Weil jedes Genom auch die Lebensweise und die Anpassungsleistungen des betreffenden Organismus an seine Umgebung reflektiert, eröffnete sich so die Möglichkeit, in relativ kurzer Zeit vielerlei neue Informationen über das bislang relativ unbekannte Bakterium zu erhalten.



A. H. PURCELL, BERKELEY

Zwergzikaden fungieren als natürliche Überträger des Schädlings.

Für die Bekämpfung eines Pflanzenschädlings ist es von großer Bedeutung, die spezifischen Wechselwirkungen zwischen ihm und seinem Wirt zu kennen. Üblicherweise besiedeln schmarotzende Mikroorganismen nur Pflanzen einer Gattung oder gar Art. Diese Wirtsspezifität wird durch Interaktionen so genannter Avirulenz-Faktoren des Krankheitserregers mit den Resistenzfaktoren des Wirtes gesteuert. *X. fastidiosa* befällt allerdings viele verschiedene Pflanzenarten. Im Einklang damit fanden sich in seinem Genom weder Gene für Avirulenz-Faktoren noch ein System zum Einschleusen solcher Stoffe in die Wirtszelle. Offenbar benötigt *X. fastidiosa* diese Substanzen nicht, weil die Zwergzikaden die Bakterien direkt und ausschließlich in die toten Zellen der Leitbündel injizieren.

Versorgung mit Mineralstoffen

Mit dem Wasserleitungssystem der Pflanze besiedeln die Bakterien ausgerechnet die nährstoffärmsten Zellen. Deshalb verfügen sie über spezielle Ionenpumpen, um die für sie lebenswichtigen Substanzen – mit erheblichem Energieaufwand – entgegen dem Konzentrationsgefälle aufzunehmen. So fanden sich allein 140 Gene für Transportproteine. Damit versorgen sich die Bakterien sowohl mit Mineralstoffen wie Sulfat, Nitrat und Phosphat als auch mit organischen Substanzen wie Kohlenhydraten, Aminosäuren, Peptiden und Vitamin B 12. Allein fünf Rezeptoren auf der Außenmembran dienen dem Transport von Eisen in die Zelle, während 67 Gene weitere Proteine des Eisen-Stoffwechsels codieren.

Das verwundert nicht; denn Spurenelemente wie Eisen, Kupfer, Zink, Molybdän oder Mangan sind als Bestandteile vieler Enzyme für den Stoffwechsel der Bakterien unentbehrlich. Obwohl nicht Eisen, sondern Magnesium das Zentralatom des Chlorophylls ist, führt auch Eisenmangel bei Pflanzen zum Abbau des grünen Blattfarbstoffes. Eventuell dient die von den Bakterien gebildete Polysaccharid-Matrix als Ionenaustauscher, denn sie vermag geladene Teilchen aus dem Wasser zu binden. Diesen Befunden zufolge trägt der Mangel an Mineralstoffen



A. H. PURCELL, BERKELEY

Befallene Bäume tragen kleine, harte, ungenießbare Früchte (rechts).



Erstes äußerliches Symptom des Befalls von Zitrusbäumen (unten links) mit dem Bakterium *Xylella fastidiosa* ist ein teilweises Ausbleichen der Blätter durch Verlust des grünen Pflanzenfarbstoffs Chlorophyll. Diese Chlorose rührt wahrscheinlich daher, dass der Schädling das Leitgewebe der Pflanze verstopft und so die Wasserversorgung behindert.





MARCOS A. MACHADO, CAMPINAS

möglicherweise mit zum Ausbleichen der Blätter bei.

Die Analyse des Genoms von *X. fastidiosa* lieferte zudem Aufschlüsse über den Energiestoffwechsel des Bakteriums. Er ist offenbar recht effizient: Der Winzling verfügt über alle Gene, um Traubenzucker (Glucose) und andere Kohlenhydrate verwerten zu können. Selbst den Abbau der für die meisten Organismen unverdaulichen Zellulose beherrscht es. Dagegen kann es mit Glyzerin nichts anfangen, das üblicherweise beim Fettabbau freigesetzt wird. Da ihm für diese Reaktionskette einige Enzyme fehlen, kommen Fette als Kohlenstoff- und Energiequelle wohl nicht in Frage. Auch der Satz an Enzymen für den Umbau von Aminosäuren in Traubenzucker scheint nicht komplett. Doch ob diese Stoffwechselwege wirklich ungenutzt bleiben, ist nicht ganz sicher: Vielleicht üben einige der vielen noch nicht identifizierten Gene die nötigen Funktionen aus.

Insgesamt hat es jedoch den Anschein, dass *X. fastidiosa* weitgehend auf Kohlenhydrate als Energiequelle und Rohstoff angewiesen ist. Es kann daraus sowohl DNA-Bausteine als auch Fettsäuren herstellen. Andererseits fehlen wiederum Enzyme für die Synthese einiger Aminosäuren. Entweder braucht das Bakterium die entsprechenden Proteinbausteine nicht, oder es benutzt zu ihrem Aufbau bislang unbekannte Enzyme.

Zu ihrem großen Erstaunen stießen die Wissenschaftler auch auf Gene für Substanzen, die bisher Krankheitserregern bei Menschen und Tieren vorbehalten schienen. Dazu gehören Proteine für das Anheften an Gewebeoberflächen. Sie ähneln denen von *Haemophilus influenzae* oder *Moraxella catharralis* – zwei Bakterien, welche die menschliche Schleimhaut besiedeln. Desgleichen fanden sich drei Gene für Substanzen, die beim Menschen an der Blutgerinnung beteiligt sind. Wozu Pflanzenschädlinge solche Stoffe benötigen, ist vorerst rätselhaft. Am wahrscheinlichsten scheint, dass sie für das Überleben in der Zwergzikade als Zwischenwirt benötigt werden.

In Brasilien wird etwa ein Drittel der Weltproduktion an Orangen angebaut und fast die Hälfte des Orangensaftkonzentrats hergestellt. Dennoch hatte die Entzifferung des Genoms eines Schädlings von Zitrusfrüchten nicht nur wirtschaftliche Bedeutung für das Land, es war auch ein wissenschaftliches Prestigeprojekt. Bis dahin stammten alle öffentlich zugänglichen Gen-Sequenzen von Laboratorien aus Nordamerika, Europa, Australien oder Japan. Brasilien ging es daher auch darum, Anschluss an die internationale Forschung auf diesem wichtigen Gebiet zu finden.

High-Tech im Schwellenland

Das ließ sich das Land einiges kosten: Insgesamt flossen über elf Millionen US-Dollar in das Projekt, das fast vollständig von der FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, Stiftung des Staates São Paulo zur Förderung der Wissenschaft) finanziert wurde; diese staatliche Stiftung erhält ein Prozent der Steuergelder, die sie nach eigenem Gutdünken für Forschungsvorhaben vergeben kann. Statt ein großes Genlabor neu einzurichten, beschloss die ONSA, 34 bereits existierende kleine Laboratorien mit den nötigen Geräten und Reagenzien für molekularbiologische Untersuchungen auszustatten und umfassend technisch zu unterstützen.

Der Erfolg spricht für sich: Mit Laboratorien, in denen nie zuvor Genome sequenziert worden waren, schafften es die brasilianischen Forscher, in weniger als einem Jahr über 90 Prozent des genetischen Codes von *X. fastidiosa* zu entziffern. Koordinatoren des Projekts wa- ▶

NACHGEHAKT

Erste genmanipulierte Kinder?

Unbemerkt von der Weltöffentlichkeit sind die ersten genmanipulierten Menschen geboren worden.“ Diese dpa-Meldung von Anfang Mai schien die schlimmsten Befürchtungen über die skrupellosen Machenschaften von Genforschern zu bestätigen. Während etwa in Deutschland gerade ein Ethikrat eingesetzt wurde, der helfen soll, Missbrauch menschlicher Embryonen zu verhindern, hätten demnach Wissenschaftler anderswo längst heimlich Fakten geschaffen.

In Wahrheit kann davon jedoch keine Rede sein. Zum einen hat Jacques Cohen von der St.-Barnabas-Klinik in Livingston (New Jersey) seine von dpa inkriminierte Behandlungsmethode für unfruchtbare Frauen keineswegs vor der Öffentlichkeit verborgen. Zum Beispiel stand bereits am 14.1.1998 ein Artikel darüber im „stern“ — immerhin der auflagenstärksten deutschen Illustrierten. Zum anderen scheint der Ausdruck „Genmanipulation“ für die angewandte Technik weit überzogen — impliziert er doch, das Erbgut der Kinder sei gezielt verändert worden, um ihnen bestimmte Eigenschaften zu verleihen.

Um das Erbgut ging es aber gar nicht. Die behandelten Frauen waren unfruchtbar, weil im Cytoplasma ihrer Eizellen, also in der Zellflüssigkeit außerhalb des Zellkerns, Stoffe fehlten, die zur Entwicklung eines Embryos nach der Befruchtung nötig sind. Cohen konnte diesen Mangel beheben, indem er Cytoplasma von normalen Eizellen anderer Frauen übertrug.

Soweit hat das alles mit Genen nichts zu tun. Die kommen nur dadurch ins Spiel, dass die im Cytoplasma gelegenen Mitochondrien — die Energieversorger der Zelle — einen kleinen Satz eigener Gene enthalten, die bei dem Verfahren unabsichtlich mit übertragen werden. Sie codieren allerdings ausschließlich Enzyme des Energiestoffwechsels, der bei allen gesunden Menschen völlig gleich ist.

Man mag in Cohens Manipulation an Eizellen ein Risiko für die daraus gezeugten Kinder sehen. Es liegt aber sicher nicht in den „fremden“ Genen.

Gerhard Trageser

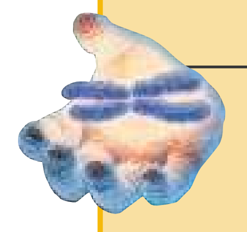
Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

ren zwei Wissenschaftler aus São Paulo sowie drei Experten aus Großbritannien und Belgien. Auch das Deutsche Krebsforschungszentrum in Heidelberg beteiligte sich. Die Daten wurden über das Internet zusammengeführt und am Zentrum für Bioinformatik der Universität Campinas ausgewertet.

Inzwischen hat sich die ONSA einem neuen Objekt zugewandt: *Xanthomonas citri*. Das ist der Verursacher einer Krebserkrankung bei Zitrusbäumen, der weltweit ähnlich hohe Ernteverluste wie *X. fastidiosa* verursacht. ■

Prof. Dr. Wolfgang Hachtel *forscht am Botanischen Institut der Universität Bonn über die Physiologie der Pflanzen. Seine Mitarbeiterin* ***Silvia Berger*** *ist Diplom-Geografin.*

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil IX)



Anlässlich der Entzifferung des menschlichen Erbguts stellen wir beispielhaft zwölf darin codierte Proteine vor.

Antikörper

Hochvariable Wunderwaffe



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England)*

Für gewöhnlich ist die Erbinformation so organisiert, dass ein Gen den Bauplan für genau ein Protein enthält, das eine bestimmte Funktion erfüllt. Die vielleicht spektakulärste Ausnahme von dieser Regel findet sich bei den Antikörpern, die Krankheitserreger abwehren helfen, indem sie sich selektiv an sie heften. Sie können in schier unvorstellbarer Vielfalt gebildet werden; denn der Körper weiß ja nicht im Voraus, wie ein künftiger Eindringling aussehen wird, und muss für jede Eventualität gewappnet sein. Deshalb vermag das Immunsystem gegen fast jede Art von Struktur, die es im molekularen Maßstab gibt, einen Antikörper herzustellen. Die Zahl solcher Strukturen wird auf 10^{11} (hundert Milliarden) geschätzt. Das ist mehr als das Dreimillionenfache der Gesamtzahl unserer Gene. Deshalb kann es unmöglich für jeden Antikörper ein eigenes Gen geben. Tatsächlich bedient sich das Immunsystem einer Reihe von Tricks – von der Kombinatorik über die Mutation bis zur Schlampigkeit –, um aus nur rund 160 Genfragmenten die benötigte Vielfalt an Abwehrwaffen erzeugen zu können.

Folgen wir Schritt für Schritt der Entstehungsgeschichte eines Mitglieds der häufigsten Antikörperfamilie, den Immunglobulinen G (IgG). Vorab sei gesagt, dass das Endprodukt aus zwei Paaren von identischen Proteinmolekülen bestehen wird, die als schwere und leichte Ketten bezeichnet werden. Jede davon gleicht einer Perlenschnur aus mehreren Bereichen oder „Domänen“, von denen einige konstant (also für alle IgGs gleich) und andere variabel sind.

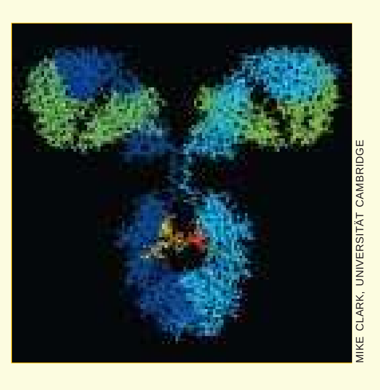
Für die Herstellung von Antikörpern ist eine bestimmte Sorte von weißen Blutkörperchen zuständig, die so genannten B-Lymphozyten. Sie entstehen in einer Vorform – Stichwort Stammzellen – im Knochenmark und durchlaufen danach erst noch einen Reifungsprozess. Dabei ordnet eine solche Zelle die Fragmente für ihre Antikörpergene rein zufällig um und entscheidet sich damit dauerhaft, welche Art von Immunglobulinen sie und ihre durch Teilung entstandenen Nachkommen herstellen werden. Dies ist der erste Schritt zur Vielfalt: Das Genom enthält Dutzende Varianten von jedem der drei oder vier benötigten Genfragmente; die reifende B-Zelle verschiebt sie so, dass im Endeffekt ein neues Gen entsteht, das je ein Exemplar der benötigten Abschnitte enthält. Die Auswahl jeweils einer Variante sowie die Entscheidung für eine Kombination aus schwerer und leichter Kette ergibt bereits rund 2,5 Millionen verschiedene Möglichkeiten.

Eine zweite Quelle der Vielfalt liegt in dem Vorgang der DNA-Bearbeitung, der den Hauptteil einer variablen Domäne (V-Fragment) mit dem nachfolgenden J-Fragment zusammenbringt, das bis zu 13 Aminosäuren codiert. Dieser Vorgang ist unpräzise und kann zur Aufnahme von ein oder zwei zusätzlichen DNA-Bausteinen („Buchstaben“) führen, die aus dem Bereich zwischen den beiden Fragmenten stammen. Dadurch verschiebt sich beim Ablesen des nachfolgenden J-Fragments das Leseraster (das die Gruppierung von jeweils drei „Buchstaben“ zu Codons oder „Wörtern“ festlegt), und es kommen völlig andere Aminosäuren heraus, als in der ursprünglichen Sequenz verschlüsselt waren. All dies gilt sowohl für leichte als auch für schwere Ketten – mit dem einzigen Unterschied, dass bei den schweren Ketten ein weiterer kurzer Genabschnitt zwischen V- und J-Fragment eingefügt wird.

Nach dieser Umorganisation der Fragmente besitzt unsere B-Zelle vollständige Gene für eine schwere und eine leichte Kette. Diese können allerdings ungewöhnlich leicht mutieren, was wiederum zur Vielfalt beiträgt. Ansonsten werden sie wie jedes andere Protein-Gen über eine Boten-RNA (Blaupause des Gens) in den Ribosomen (Proteinfabriken der Zelle) in Aminosäureketten umgesetzt. Die fertigen schweren und leichten Ketten lagern sich zu der charakteristischen Y-Struktur zusammen, die zusätzlich durch so genannte Disulfidbrücken vernetzt und mit Kohlenhydratgruppen modifiziert wird. Und dann kann unser Antikörper auf die Jagd nach „seinen“ Antigenen gehen. Sollte er welche finden, vermehrt sich die zugehörige B-Zelle durch wiederholte Teilungen, damit innerhalb kurzer Zeit möglichst viele Immunglobuline gebildet werden, die den Kampf mit dem Eindringling aufnehmen können.

Steckbrief

- Molekulargewicht: ca. 150 000
- Aminosäuren: ca. 1300
- 2 schwere Ketten mit je 4 Domänen
- 2 leichte Ketten mit je 2 Domänen
- Immunabwehr
- Chromosom Nr. 2, Nr. 14 und Nr. 22



MIKE CLARK, UNIVERSITÄT CAMBRIDGE

Antikörper haben eine Y-förmige Struktur und bestehen aus zwei schweren (blau) und zwei leichten Ketten (grün). Außerdem enthalten sie kleinere Kohlenhydrat-Gruppen (gelb und rot).

HIRNFORSCHUNG

Wie arbeitet das Gehirn eines Rechenkünstlers?

Mit erstaunlichen Kopfrechenkünsten sorgte der 29-jährige Rüdiger Gamm in Fernsehshows wie „Wetten dass ..?“ für Aufsehen. Jetzt haben Hirnforscher sein Geheimnis gelüftet.

Von Thomas Früh

Eine kleine Kopfrechenaufgabe gefällig, zum Beispiel 2 + 2 ? Das ist Ihnen zu einfach? Wie wäre es mit 76 × 68 ? Schon schwieriger, aber mit dem großen Einmaleins und einigen Rechenregeln aus der Grundschule bewältigen Sie auch dies ohne Papier und Bleistift. Möchten Sie es zum Schluss einmal mit 53^9 probieren? Lieber doch nicht? Für den 29-jährigen Rüdiger Gamm ist diese Kopfrechenaufgabe kein Problem. Nach wenigen Sekunden präsentiert er das exakte Ergebnis. Mit diesen und anderen Rechenkünsten hat er bereits das Millionenpublikum von „Wetten dass ..?“ verblüfft. Warum ist seine Leistung für uns so erstaunlich, und was befähigt ihn dazu?

Schon die mittelschwere Multiplikation 76 × 68 fordert unsere ganze Konzentration. Nicht weniger als sieben Rechenschritte müssen ausgeführt sowie sechs Zwischenergebnisse gespeichert und wieder vergessen werden. Unser Gehirn legt die Zwischenresultate im so genannten Arbeitsgedächtnis ab. Das ist ein Kurzzeitspeicher, in dem wir Informationen einige Minuten bewahren können, wenn wir sie aktiv wiederholen. So merken wir uns eine Telefonnummer, während wir sie in die Tastatur des Handys tippen. Aber schon hier stoßen wir an die Kapazitätsgrenzen des Kurzzeitspeichers: Maximal sieben Informationseinheiten passen da hinein, zum Beispiel eine zufällige Folge von sieben Ziffern oder Buchstaben.

Gamms Arbeitsgedächtnis kann immerhin elf Elemente fassen. Und oft entlastet er es, indem er, statt zu rechnen, die Ergebnisse einfach abruft. Deshalb das kommt Resultat von 76 × 76 bei ihm wie aus der Pistole geschossen. Gamm entnimmt es einer Rechentafel mit Quadratzahlen, die er – genauso wie Tabellen mit Quadrat- und Kubikwurzeln – mit bewundernswertem Fleiß auswendig gelernt hat. Anders bei 76 × 68 – da rechnet er und braucht für die sieben Schritte und sechs Zwischenergebnisse immerhin vier Sekunden. Dabei wird sein Arbeitsgedächtnis zwar beansprucht, aber nicht überfordert. Dagegen müsste es bei 53^9 eigentlich passen, denn schon 53^7 hat mehr als elf Ziffern. Aber Gamm kümmert dies wenig. Er schweigt ein paar Sekunden länger – dann verkündet er das Ergebnis.

Jetzt haben belgische und französische Forscher um den Neuropsychologen Mauro Pesenti von der Katholischen Universität von Louvain den Versuch unternommen, Gamms fabelhafte Leistungen zu enträtseln. Dazu verglichen sie seine Hirnaktivität beim Kopfrechnen mit derjenigen von sechs Personen mit durchschnittlichem Rechentalent (*Nature Neuroscience, Bd. 4, S. 103*). Für den Test bereiteten die Forscher Aufgaben vor, die auf beide Leistungsniveaus Rücksicht nahmen. Dann baten sie die Kandidaten zum Kopfrechnen im Akkord: Ein Bildschirm präsentierte die erste Aufgabe; sobald der Proband das Ergebnis richtig aufsagte, erschien die nächste Frage, und so fort. Währenddessen machten die Forscher mit der Positronenemissionstomografie, einer Schwester der Computertomografie, die räumlichen Muster der Hirnaktivität sichtbar.


NATURE NEUROSCIENCE

Die Hirnareale, die beim Kopfrechnen in Aktion treten (grün), zählen zum Arbeitsgedächtnis oder steuern die Fingerbewegung. Bei dem Rechenkünstler Gamm waren außerdem bestimmte Zonen des Langzeitgedächtnisses beteiligt (rot).

Zunächst fanden sie ihre Vermutung über das Arbeitsgedächtnis bestätigt: Bei allen Probanden leistete es Schwerstarbeit. Das galt besonders für jenen Bereich, der sich mit der Zwischenspeicherung räumlich-visueller Informationen beschäftigt; Hirnforscher nennen ihn den „räumlich-visuellen Notizblock“. Dieser Befund ist insofern bemerkenswert, als Zahlen an sich keine räumlich-visuelle Qualität haben. Eine Neuronengruppe, die gewöhnlich immer dann aktiv wird, wenn wir unsere Finger bewegen, lief ebenfalls heiß. Offensichtlich hinterlässt die frühkindliche Art des Zählens und Rechnens Spuren im Gehirn: Die gleichen Neuronen, die damals beansprucht wurden, beteiligen sich auch an den Rechenleistungen des Erwachsenen.

Doch aufschlussreicher als die Gemeinsamkeiten waren die Unterschiede, die in den Gehirnen der Probanden zum Vorschein kamen: Bei Gamm zeigten fünf weitere Hirnareale, die bei den durchschnittlichen Rechentalenten untätig waren, einen kräftig erhöhten Aktivitätspegel. Sie zählten vorwiegend zum Langzeitgedächtnis, und zwar zu jenem Teil, der Episoden speichert, zum Beispiel eine Szene in einem Restaurant. Wenn wir uns an das köstliche Menü erinnern, dann kommt uns auch rasch wieder in den Sinn, was sich sonst noch während des Essens, aber auch davor und danach ereignete. Das episodische Gedächtnis bettet Vergangenes immer in einen raum-zeitlichen Zusammenhang ein.

Nun beruhen Gamms Fähigkeiten nicht zuletzt auf hartem Training. Seit er sich vor einigen Jahren erstmals für eine Fernsehshow bewarb, hat er täglich stundenlang Zahlenwissen und Rechenregeln gepaukt. Dabei hat er sein Langzeitgedächtnis offenbar zu einer gut bestückten und wohl sortierten Spezialbibliothek ausgebaut. Nach eigenem Bekunden strukturiert er den Dschungel der Zahlenwelt mit Hilfe visueller Vorstellungen. Auf diese Weise gelingt es ihm, das raumzeitliche Ordnungsprinzip des episodischen Gedächtnisses zu nutzen. Damit kann er bei Bedarf schnell auf einzelne Fakten zugreifen.

 (Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

Und es gibt noch eine weitere Erklärung für den hohen Aktivitätspegel in Gamms episodischem Gedächtnis. Sie liegt in der Natur der Rechenaufgaben selbst: Mit ihren Schritten und Zwischenresultaten bieten sie sich für eine Übersetzung in ein raum-zeitliches Muster geradezu an. Zwar ist für Kopfrechnen normalerweise das Arbeitsgedächtnis zuständig. Doch Gamms Training hat wohl das teilweise Outsourcing dieser mühsamen Tätigkeit ins episodische Langzeitgedächtnis bewirkt.

Dessen schier unerschöpfliche Möglichkeiten nutzten übrigens, ohne es zu ahnen, bereits die Rhetoriker der Antike. Cicero empfahl Rednern, sich ein Gebäude mit Zimmern und Gegenständen vorzustellen und die Stichpunkte der Rede diesen Orten zuzuweisen. Beim Vortrag sollten sie dann im Geiste durch das Gebäude gehen und die Stichpunkte nacheinander abrufen. Über 2000 Jahre nach Ciceros Rat offenbart die moderne Hirnforschung am Beispiel eines Rechenkünstlers, welches Potenzial im Langzeitgedächtnis steckt. ■

Thomas Früh *ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist.*

AM RANDE

UFOs auf die Rote Liste?

Alarm: Die Zahl der in Deutschland gemeldeten UFO-Sichtungen sei von 100 im Jahre 1995 auf gerade mal 10 im vergangenen Jahr zurückgegangen, berichtete unlängst der Ufologe Werner Walter von der nationalen Untertassen-Meldestelle in Mannheim. Konsequenzen aus diesem Verschwinden einer seltenen Spezies forderte er erstaunlicherweise nicht. Gehören E. T. und Kollegen nicht auf die Rote Liste? Vor allem aber: warum der Rückgang?

Doch fragen wir einmal anders herum: Warum sollten die intergalaktischen Gäste bleiben? Nehmen wir einmal an, die Besatzung eines Raumschiffes habe sich entschlossen, ganz offiziell in die Bundesrepublik einzuwandern. So wünschenswert eine Greencard für grüne Männchen vor allem in der IT-Branche wäre, stellten sich doch erhebliche bürokratische Hindernisse in den Weg. Wer garantierte, dass ihr Heimatplanet MKS-frei ist? Wie hielten es die Aliens mit den Werten der deutschen Leitkultur? Sprächen sie überhaupt Deutsch? Und wären sie stolz, alsbald Deutsche zu sein und nicht mehr nur Sirianer?

Vielleicht aber meiden unsere Brüder aus dem All die Erde global gesehen – aus den USA gibt es ähnliche Alarmmeldungen. Zu verdenken wäre es ihnen nicht, schließlich machen Treibhauseffekt, übermäßiger Landverbrauch und all die anderen kleinen und großen Umweltkatastrophen den blauen Planeten immer unwirtlicher. Längst täuscht sein herrlicher Anblick aus dem All den interstellaren Pauschaltouristen nicht mehr. Eines ist sicher: Wenn die Begleiter der Menschheit nach Äonen der Evolution ihre Sachen packen und ein Umleitungsschild außerhalb des Sonnensystems installieren, kann das nichts Gutes bedeuten. Zumindest kostet es Arbeitsplätze: in den Medien und einschlägigen Buchverlagen.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

QUANTENPHYSIK

Verschränkung total

Kunstvolle Experimente scheinen nach 100 Jahren Quantenphysik die Indizienkette für die Vollständigkeit – und unaufhebbare Seltsamkeit – der Quantenmechanik endlich vervollständigt zu haben.

Von Michael Springer

Gemäß der Quantentheorie kann ein mikrophysikalisches System als Überlagerung von Zuständen existieren, die einander klassisch betrachtet ausschließen müssten – ein Gedanke, dem selbst Gründerväter der neuen Theorie wie Einstein und Schrödinger nicht folgen mochten. Um die vermeintliche Absurdität solcher Zustandsüberlagerungen zu demonstrieren, ersann Schrödinger bekanntlich die nach ihm benannte legendäre Katze, die beliebig lange in einer Überlagerung zwischen Leben und Tod verharrt. Einstein wiederum konzipierte ein System aus zwei Teilchen, die einen gemeinsamen Quantenzustand bilden – Schrödinger nannte solche Teilchen „verschränkt“ –, selbst wenn sie sich noch so weit voneinander entfernen. Misst man also eine Quanteneigenschaft des einen Teilchens, dann nimmt sein Partner – über beliebig große Distanzen hinweg! – die für ihn durch den gemeinsamen Zustand vorgegebene Eigenschaft an. Dies widerspricht dem in der klassischen Physik selbstverständlichen Postulat des „lokalen Realismus“, welches besagt: Die Eigenschaften eines Teilchens können nicht die eines anderen in großer Entfernung beeinflussen, und darum müssen alle Eigenschaften jedes Teilchens schon vor der Messung existiert haben.

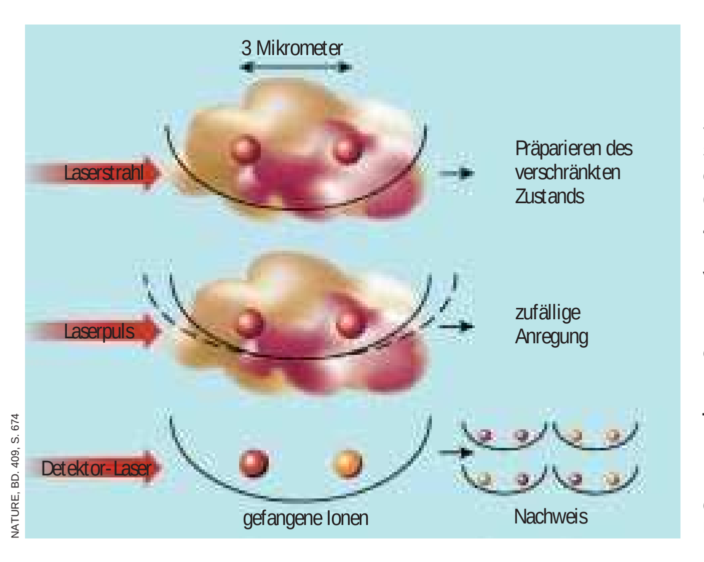
Die Debatte um den Bruch des lokalen Realismus wäre wohl ein Thema für Naturphilosophen geblieben, hätte nicht der Physiker John S. Bell 1964 vorgerechnet, dass sich die Frage im Prinzip experimentell entscheiden lässt. Produziert man wie am Fließband gleichartige Paare von verschränkten Teilchen genügend oft und misst ihre Quanteneigenschaften, so müsste die Verteilung der Messresultate, falls der lokale Realismus gälte, der so genannten Bellschen Ungleichung gehorchen – andernfalls nicht. Doch bis tief in die zweite Hälfte des vorigen Jahrhunderts gab es nur wenige Experimente, die zuverlässig Serien verschränkter Zustände zu erzeugen und die räumlich getrennten Komponenten exakt genug zu messen vermochten. Alle derartigen Ergebnisse sprachen eher für eine Verletzung der Bellschen Ungleichung und somit für die Quantentheorie und gegen den lokalen Realismus. Aber dessen hartnäckige Anhänger – sozusagen die Anwälte des gesunden Menschenverstandes in der Quantentheorie – waren damit nicht zu überzeugen.

Messung ohne Ausnahme

Das stärkste Argument der Verfechter des klassischen Realismus war, dass bei solchen Messreihen viel mehr verschränkte Teilchenpaare produziert wurden – in den Versuchen von Alain Aspect in Paris handelte es sich um Lichtquanten –, als hinterher gemessen werden konnten. Mit anderen Worten, die Verschränkungs-Experimentatoren schlossen notgedrungen stets von einer sehr kleinen Stichprobe gemessener Werte auf die Verteilung einer sehr viel größeren Gesamtheit von nicht gemessenen Werten. Also konnte es immerhin sein, dass aus irgendeinem Grund die Bellsche Ungleichung zwar bei der Stichprobe verletzt wurde, nicht aber bei der Gesamtheit – und durch diese statistische Hintertür wäre der lokale Realismus vielleicht doch noch zu retten gewesen.

Erst jetzt ist es einem Team um M. A. Rowe am National Institute of Standards and Technology in Boulder (US-Bundesstaat Colorado) gelungen, dieses Schlupfloch zu schließen und eine komplette Messung sämtlicher im Experiment erzeugter verschränkter Paare zu erreichen (*Nature, Bd. 409, S. 791*). Die Forscher versetzten zwei in einer so genannten Paul-Falle gefangene Beryllium-Ionen durch zwei gekreuzte Laserstrahlen in eine Überlagerung von zwei Anregungszuständen. Obwohl die beiden Ionen sich in einem – für atomare Verhältnisse sehr großen – Abstand von 0,003 Millimetern voneinander aufhielten, waren sie verschränkt und bildeten eine Superposition der beiden für das Ionenpaar möglichen Anregungszustände. Dieses Kunststück konnten die Experimentatoren beliebig oft wiederholen (Bild).

Nun wurden die beiden verschränkten Ionen durch einen zusätzlichen kurzen Laserpuls und gleichzeitiges Variieren der Paul-Falle gleichsam aus dem Tritt gebracht und individuell markiert; sie blieben dabei zwar noch immer verschränkt, aber der Anregungszustand des einen Ions unterschied sich nun in zufälliger Weise von dem des Partners. Jetzt erst, im dritten Schritt, erfolgte der Messvorgang: Ein Laser bestrahlte das Ionenpaar und löste dadurch je nach individuellem Anregungszustand nur in einem Ion, in keinem oder in beiden Ionen die Emission von Lichtquanten aus. Die so in ▶



So gelang der vollständige Test der so genannten Bellschen Ungleichung, die gelten müsste, wenn die Quantenmechanik lückenhaft wäre. Zwei in einer Paul-Falle gefangene Ionen wurden durch einen Laser verschränkt und durch einen weiteren Laserpuls sowie Verschieben der Falle einzeln in zufälliger Weise an- oder abgeregt. Schließlich veranlasste ein Detektor-Laser die Ionen je nach ihrem Anregungszustand, Lichtquanten zu emittieren oder nicht (helle oder dunkle Färbung). Die Häufigkeitsverteilung der Messergebnisse verletzte die Bellsche Ungleichung.

20000 Durchgängen gemessene vollständige Verteilung aller Resultate bestätigte zweifelsfrei eine deutliche Verletzung der Bellschen Ungleichung – ein etwas verspätetes Geburtstagsgeschenk an die Quantentheorie und eine posthume Widerlegung der Bedenken von Einstein und Schrödinger.

Nur eine Woche später meldete „Nature“ (*Bd. 409, S. 1014*) den nächsten Verschränkungstrick, diesmal ausgeführt von Paul Kwiat und seinen Mitarbeitern vom Los Alamos National Laboratory (New Mexico) und von der Universität Genf. Sie arbeiteten mit unterschiedlich polarisierten Lichtquanten und gewannen durch raffiniert eingesetzte Polarisationsfilter aus nur unvollkommen verschränkten Teilchenpaaren maximal verschränkte. Dies wiesen sie nach, indem sie an den manipulierten Paaren die Verletzung der Bellschen Ungleichung demonstrieren konnten.

Zuvor ist stets nur der umgekehrte Vorgang realisiert worden: Aus zunächst verschränkten Paaren werden durch Wechselwirkung mit der Umwelt unverschränkte. Dieser Ablauf ist ein Beispiel für so genannte Dekohärenz, denn verschränkte Teilchen bilden einen „kohärenten“ Quantenzustand. Dekohärenz ist gang und gäbe; sie geschieht bei jedem Messvorgang und verwandelt das Sowohl-als-auch der Quantensuperpositionen in das „klassische“ Entweder-oder des Messresultats. Das Team um Kwiat ging nun aber von einem „fast klassischen“ Zustand aus, in dem eine bestimmte Zustandskomponente dominierte; zum Beispiel waren beide Lichtquanten anfangs fast vollständig vertikal polarisiert, und ihr gemeinsamer Zustand enthielt nur schwache Beimengungen der anderen möglichen Kombinationen von vertikaler und horizontaler Polarisation für zwei Lichtteilchen. Erst durch raffinierte Filterung „destillierten“ die Forscher daraus einen maximal verschränkten Quantenzustand aus gleichermaßen vertikal und horizontal polarisierten Paaren.

Den Spieß umkehren

Kwiat und seine Mitarbeiter sprechen darum von einer in den (fast) klassischen Zuständen „verborgenen Nicht-Lokalität“, die durch den Destillationsprozess zu Tage tritt. Damit haben sie den Spieß, mit dem Einstein die Nicht-Lokalität der Quantentheorie durch Einführen verborgener Variabler erledigen wollte, erfolgreich umgedreht. Hinter der vermeintlich unvollständigen Quantentheorie verbirgt sich keine noch tiefere Physik, die dem klassischen Postulat des lokalen Realismus genügt, sondern hinter jedem vermeintlich klassischen Zustand verbirgt sich ein Gemisch von Quantenzuständen, das durch Destillation nachweisbar ist.

Die beiden Kunststücke – vollständige Messung der Verschränkung und Verschränkungsdestillation – haben nicht nur theoretischen Wert. In künftigen Quantencomputern wird man maximal verschränkte Zustände wie am Fließband produzieren müssen. Solche Experimente zeigen, dass das im Prinzip möglich ist. ■

Michael Springer *ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.*

AM RANDE

Stoppt Alzheimer – spielt Schach!

Michael Groß weiß, wie wir uns vor dem Big-Brother-Syndrom schützen können

Darwins Mitstreiter Thomas Huxley (1825–1895) beobachtete dieses erschreckende Phänomen bereits im Tierreich: Wenn gewisse Meeresbewohner vom geistig anspruchsvollen Vagabundenleben Abschied nehmen und sich als Dauergäste etwa auf einer Schiffsplanke niederlassen, wo sie lediglich aus dem vorbeiströmenden Wasser Nährstoffe filtrieren müssen, bauen sie die überflüssig gewordenen Teile des eigenen Hirns ab. Der Genetiker und Autor Steve Jones weitete diese Beobachtung in seinem Buch „Almost Like a Whale“ (auf deutsch: „Wie der Wal zur Flosse kam“) auf den Menschen aus, als er konstatierte, dass manche Professoren auf die Erringung einer Dauerstelle (*tenure*) ähnlich reagieren.

Doch da Professoren keine eigene Spezies darstellen, ist Ähnliches möglicherweise für Homo sapiens ja ganz allgemein zutreffend. Nach den denk-intensiven Jahren der Schul-, Universitäts- oder Berufsausbildung sind manche froh, wenn sie sich auf ihrer Schiffsplanke niederlassen und die jeweils aktuelle Serie von Big Brother oder Girlscamp filtrieren können. Und wenn ökonomische Zwänge des Berufslebens sie allzu sehr zu geistiger Tätigkeit zwingen, neigen sie in der Freizeit besonders zum Abschalten.

Eine neue epidemiologische Studie aus den USA sollte allerdings zumindest denjenigen zu denken geben, bei denen die Hirnabschaltung noch halbwegs reversibel ist. Es war bereits vorher bekannt, dass hoher Bildungsgrad und anspruchsvolle Berufstätigkeit die Wahrscheinlichkeit verringern, an der Alzheimerschen Demenz zu erkranken. Nun fand das Team von Robert Friedland in Cleveland im US-Bundesstaat Ohio heraus, dass diese Wahrscheinlichkeit (bei gleichem Bildungsgrad und Berufsstatus) in signifikantem Zusammenhang mit der Teilnahme an Freizeitbeschäftigungen im mittleren Lebensalter steht. Am besten „schützen“, so Friedland, geistig anspruchsvolle Tätigkeiten wie Schachspielen oder Sprachenlernen. Womöglich hilft auch Spektrum-der-Wissenschaft-Lesen. Vielfältige sportliche und sogar „passive“ Hobbys hätten zwar auch einen messbaren positiven Effekt. Der sei der Statistik nach allerdings geringer als bei intellektuell anspruchsvollen Beschäftigungen.

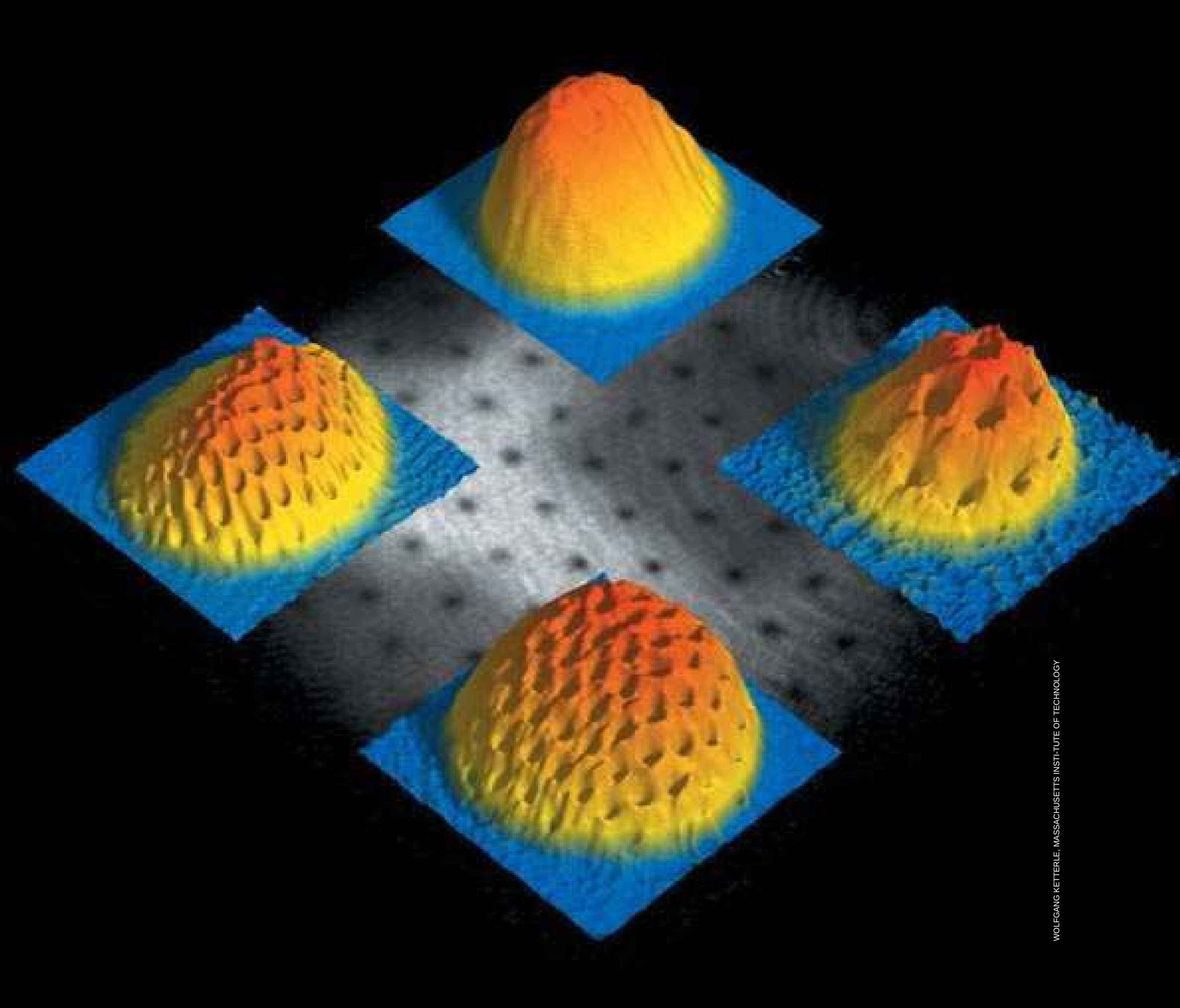
Wie das mit Statistiken so ist, kann man nicht mit Sicherheit sagen, dass die Korrelation einen ursächlichen Zusammenhang enthüllt. Vielleicht schützt Schachspielen vor Alzheimer, vielleicht ist aber der Unwille zu geistiger Anstrengung in der Freizeit bereits das erste Symptom der Erkrankung, die erst Jahrzehnte später diagnostiziert wird. Oder beide Phänomene hängen von einer dritten, bisher nicht bekannten Variablen ab, etwa der Verfügbarkeit gesunder, nicht ausgelasteter Hirnzellen.

Wie dem auch sei, es ist zumindest denkbar, dass man sich mit geistigem Fitnesstraining vor Alzheimer schützen kann. Und selbst wenn der Kausalzusammenhang andersherum gelagert ist, wer wird sich schon durch offenkundige geistige Trägheit als zukünftiger Alzheimerpatient outen wollen? Also, keine Müdigkeit vorschützen! Sie und ich, wir haben ja schon einen Fitnesspunkt durch Spektrum-Lesen erworben. Nun lasset uns alle Schiffsplanken meiden und die Dummheit bekämpfen, ein neues Musikinstrument und eine zusätzliche Sprache erlernen, Schach spielen oder Differenzialgleichungen lösen. Wer das in mittleren Lebensjahren noch schafft, hat gute Chancen, sich im Alter noch daran zu erinnern. Und, liebe Frau Bundesgesundheitsministerin, vielleicht sollten Sie für solch lobenswerte Aktivitäten Bonuspunkte bei der Pflegeversicherung einführen.

www.michaelgross.co.uk

Wirbel im Quantengas

Bose-Einstein-Kondensate aus Gasatomen verhalten sich wie Supraflüssigkeiten, die keine innere Reibung haben und daher auch nicht als Ganzes rotieren können; statt dessen bilden sich gleichmäßig angeordnete Wirbel, die den zugeführten Drehimpuls aufnehmen. Zur Demonstration „rührte“ Wolfgang Ketterle vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge ein Bose-Einstein-Kondensat aus Natrium-Atomen mit Laserstrahlen um. Je nach dem erteilten Drall entstanden unterschiedlich viele Wirbel: 0, 16, 70 und 130 im gezeigten Beispiel. Dargestellt ist dreidimensional und farbcodiert die Dichteverteilung eines Querschnitts der Atomwolke mit einem Millimeter Durchmesser. Die Wirbel erscheinen als Dichteminima („Löcher“).



WOLFGANG KETTERLE, MASSACHUSETTS INSTI-TUTE OF TECHNOLOGY

Science and Fun

Spektrum DER WISSENSCHAFT

WENDEKREISEL

Lassen Sie sich von einem physikalischen Prinzip faszinieren, das schon Generationen von Wissenschaftlern zu angeregten Diskussionen verleitet hat. In Drehung versetzt, verliert der Kreisel seine stabile Ruhelage und kommt ins Schleudern. Dreht er sich schnell genug, setzt er irgendwann mit seinem Stiel auf dem Boden auf und steht Kopf; **DM 34,–.**





SWINGING STICKS

Fast einem Perpetuum mobile gleich, scheinen die Schwingenden Stäbe der Gravitation zu trotzen. Lautlos kreisen die Stäbe ohne anzuhalten. An diesem Phänomen haben ein Elektroniker und ein Designer mehrere Jahre gearbeitet. Wichtiger Bestandteil neben der technischen Herausforderung war die Entwicklung eines edlen und leichten Designs in einer Metall-Holz-Kombination. Einzeln in Präzisionshandarbeit gefertigt, ist jedes von ihnen ein Unikat. Lieferung inklusive Batterien gegen Vorkasse; große Ausführung Format 865 x 810 x 140 mm **DM 899,–;** kleine Ausführung Format 445 x 415 x 100 mm **DM 579,-** (inkl. Versand Inland).

FUNK-THERMOMETER

Das Design-Thermometer misst nicht nur die Raumtemperatur. Es wird komplett mit Batterien und einem Sensor für die Außentemperatur geliefert. Die integrierte Funkuhr zeigt Ihnen immer die genaue Uhrzeit an; **DM 94,–**.



JUNIOR WISSEN

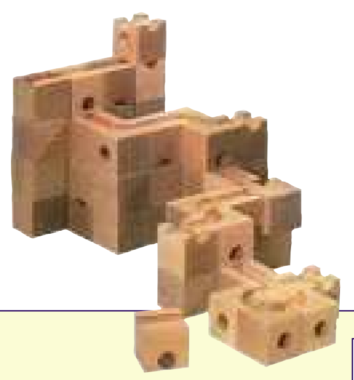
GLOBE 4 KIDS

Mit diesem Kinderglobus können künftige Weltenbummler unseren Planeten erforschen. Neben den geografischen Grenzen enthält er über hundert Zeichnungen von Tieren, Monumenten und Sehenswürdigkeiten einzelner Länder und Regionen; **DM 54,–**.



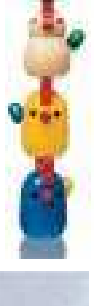
MURMELBAHN

Die verschiedenen Würfel mit vielfältigen Bohrungen und Rinnen ermöglichen die Konstruktion von einfachen bis sehr komplizierten Murmelbahnen. Die richtige Kombination der Würfel ergibt Bahnen, die sowohl auf der Oberfläche der Würfel, als auch in Tunneln im Innern derselben verlaufen. Der kleine Baumeister (ab 4 Jahren) bestimmt den Kugellauf ganz allein. Der Standardbaukasten von Cuboro enthält 54 Buchenholzwürfel (Kantenlänge 5 cm) mit 12 verschiedenen Funktionen; **DM 239,–**.



ZICKE ZACKE

Bei der Hühnerolympiade steht die Disziplin Federklau auf dem Programm. Dabei versuchen die 2 - 4 mitspielenden „Hühner“, sich gegenseitig zu überholen. Aber nur, wer sich auf dem Hühnerhof auskennt, kommt gut voran. Das Spiel für kleine Kinder ab 4 Jahren trainiert das Gedächtnis. Spieldauer: 10 - 15 Minuten; **DM 59,–.**



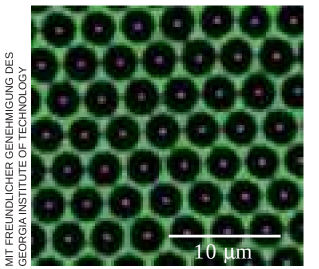


INFORMATIONS- UND BESTELLSERVICE →

PHOTONIK

Gehauchte Muster

Der Arbeitsgruppe um Mohan Srinivasarao vom Georgia Institute of Technology in Atlanta ist es gelungen, einen Polymerfilm mit regelmäßig angeordneten Luftbläschen herzustellen. Die Struktur könnte als selektiver Lichtleiter fungieren und somit für die Photonik interessant sein. Das Verfahren besticht insbesondere durch seine Einfachheit. Polymere mit ringförmigen Molekülen als Kettengliedern – beispielsweise Polystyrol – werden in Toluol oder Benzol gelöst und auf eine Glasplatte aufgetragen, über die ein feuchter Luftstrom streicht. Während das Lösungsmittel verdunstet, kühlt sich die Mischung um bis zu 25 Grad Celsius ab. Dabei kondensiert Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche und bildet einen Teppich von dicht gepackten Wassertröpfchen, die ihrer größeren Dichte wegen einsinken, während die Lösung darüber sich wieder schließt. Dieser Prozess wiederholt sich, bis das Lösungsmittel vollständig verdunstet ist; zurück bleibt ein Polymerfilm mit mehreren Lagen Wassertröpfchen. Durch die nachfolgende Verdunstung des Wassers entsteht ein dreidimensionales Netzwerk von gleichförmigen, miteinander verbundenen Luftbläschen, die je nach Prozessbedingungen zwischen 0,2 und 20 Mikrometer groß sind. *(Science, Bd. 292, S. 79)*



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Polymer mit wabenartig angeordneten Luftbläschen

CHRONOBIOLOGIE

Stellräder für die innere Uhr

Wie wir Menschen haben Mäuse einen ausgeprägten – wenn auch genau den umgekehrten – Tagesrhythmus: Sobald es abends dunkel wird, erwachen die nachtaktiven Nager zum Leben. Und wie wir Menschen können Mäuse ihre innere Uhr an veränderte Bedingungen anpassen: Verlängert künstliches Licht am Abend die Helligkeitsperiode um eine Viertelstunde, werden die Tiere in der nächsten Nacht erst später munter; setzt dagegen die Helligkeit am Morgen früher ein, beginnen sie ihre abendlichen Streifzüge entsprechend eher. Wie Urs Albrecht vom Max-Planck-Institut für Experimentelle Endokrinologie und seine Kollegen vom Baylor College of Medicine in Houston (Texas) nun nachgewiesen haben, sind an dieser Anpassung zwei Gene beteiligt, von denen man schon länger weiß, dass sie mit circadianen Rhythmen zu tun haben: Per1 und Per2. Mäuse, bei denen die Forscher Per1 blockiert hatten, verloren die Fähigkeit, ihre innere Uhr vorzustellen, während Nager mit ausgeschaltetem Per2 sie nicht mehr zurückstellen konnten. Dieser Befund ist vermutlich auf den Menschen übertragbar. So entdeckten Forscher bei Patienten, die am Syndrom der vorverlagerten Schlafphase leiden, ein defektes Per2-Gen. *(Journal of Biological Rhythms, Bd. 16, Nr. 2, S. 100)*



Maus beim Aktivitätstest

MPG

PALÄONTOLOGIE

Der erste Molch ging in Asien an Land

Vor 150 Millionen Jahren – am Ende des Jura – brach in China ein Vulkan aus und verschüttete innerhalb von Sekunden einen zehn Quadratmeter großen See. In der versteinerten Asche entdeckten Ke-Quin Gao vom American Museum of National History in New York und Neil Shubin von der Universität Chicago jetzt über 500 Fossilien von Schwanzlurchen verschiedenster Arten und Entwicklungsstadien. Bei den meisten sind sowohl die Skelette als auch die Abdrücke der Gewebe sehr gut erhalten. Eine Tierart war sogar ganz unbekannt. Die größte Sensation aber ist, dass die Versteinerungen 85 Millionen Jahre älter sind als alle bisher gefundenen Schwanzlurch-Fossilien. Damit schließt der Fund eine Lücke und belegt, dass diese Tierordnung aus Asien stammt. Salamander und Molche gelten als lebende Fossilien, denn ihr Körperbau hat sich seit Jahrmillionen selbst in feinsten Details nicht verändert. „Wir haben hier ein Tier, das mindestens 150 Millionen Jahre existierte: Es überlebte mehrere Aussterbewellen, ja es überlebte sogar die Ursache für den Untergang der Dinosaurier", erläutert Shubin. „Doch heute verschwinden die Schwanzlurche zusammen mit allen anderen Amphibien – und wir wissen nicht warum." *(Nature, Bd. 410, S. 574)*



NATURE

An den uralten Schwanzlurch-Fossilien aus China sind teils sogar die Kiemen zu erkennen (Pfeile).

BIOLOGIE

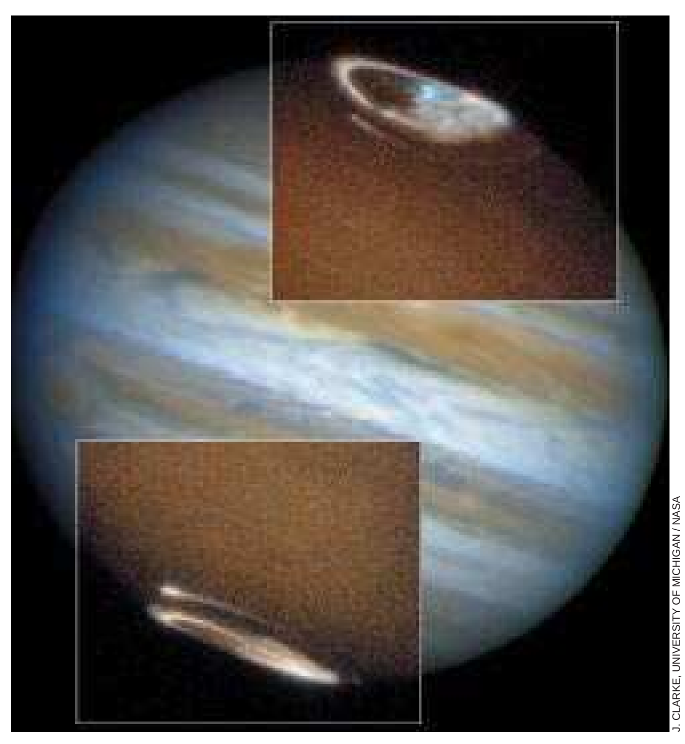
Morden für die Freunde

Eine wunderbare Freundschaft, die so genannte Mykorrhiza, ist im Pflanzenreich weit verbreitet: Ein Pilz versorgt seine Wirtspflanze mit Mineralsalzen aus dem Boden und wird von ihr mit organischen Verbindungen belohnt. Wie weit diese Freundschaft geht, entdeckten nun John Klironomos und Miranda Hart von der Universität Guelph (kanadische Provinz Ontario) bei einer Routineuntersuchung der Mykorrhiza zwischen der Weymouths-Kiefer und dem Pilz *Laccaria bicolor*. Danach schreckt dieser Pilz nicht einmal vor Mord an der Springschwanzart *Folsomia candida* zurück, um den Nährstoffbedarf seiner Partnerpflanze zu decken: Im Einzugsbereich des Pflanzenbündnisses überlebten, wie die Forscher überrascht feststellten, innerhalb von zwei Wochen weniger als fünf Prozent der flügellosen Insekten. Wahrscheinlich gibt dieser Pilz einen Giftstoff ab, der die Springschwänze lähmt und tötet. Dann nimmt er den Stickstoff seiner Opfer auf und leitet ihn an seine Wirtspflanze weiter, die dadurch offensichtlich auch auf stickstoffarmem Boden prächtig gedeiht. Andere untersuchte Pilzarten ließen die winzigen Insekten jedoch am Leben.

ASTRONOMIE

Riesiges Nordlicht auf Jupiter

Die Ursache der irdischen Polarlichter ist der Sonnenwind – ein wechselhafter Strom elektrischer Partikel, die den Linien des Erdmagnetfelds folgen und mit hoher Energie polwärts stürzen. Die Teilchen prallen dabei auf die Atmosphäre und regen sie zum Leuchten an. Auch die Pole des Jupiters zeigen solche spektakulären Leuchtfeuer. Allerdings erreicht der Sonnenwind den fernen Riesenplaneten nur noch als laues Lüftchen, dem bisher niemand die Erzeugung von Polarlichtern zutraute. Stattdessen sollen sie nach gängiger Auffassung ausschließlich von Partikeln verursacht werden, die den Vulkanen des Mondes Io entstammen. Fotoserien, die Astronomen um Jack H. Waite von der Universität Michigan in Ann Arbor mit dem Hubble-Weltraumteleskop schossen, erschüttern jetzt diese Vorstellung. Sie zeigen ein plötzliches Aufflammen der Atmosphäre am Jupiter-Nordpol. Binnen 70 Sekunden erfasste die Leuchterscheinung ein Gebiet von der Größe der Erdoberfläche, um ebenso schnell zu verlöschen. Die Helligkeit des gigantischen Ausbruchs übertraf das bisher stärkste Nordlicht um das Zehnfache. Aus der Orientierung des Magnetfelds am Ort der Leuchtspuren war zu schließen, dass der ursächliche Teilchenregen aus der Richtung der Sonne kam, und zwar aus einem Gebiet weit jenseits von Io. Der Sonnenwind hat also bei den Polarlichtern des Jupiters wohl doch seine Hand im Spiel. Um seine genaue Rolle zu klären, hoffen die Astronomen nun auf Daten der Raumsonde Cassini. *(Nature, Bd. 410, S. 787)*



J. CLARKE, UNIVERSITY OF MICHIGAN / NASA

Ultraviolettes Leuchten an Jupiters Polen

MEDIZINTECHNIK

„RoboDent“ kennt keinen Schmerz

Der Besuch beim Zahnarzt treibt manchem den Angstschweiß auf die Stirn, insbesondere wenn größere Eingriffe wie Implantationen anstehen. Doch das Zittern vor dem Bohrer gehört vielleicht bald der Vergangenheit an; denn nun stellten Jürgen Bier und Tim Lüth vom Universitätsklinikum Charité in Berlin einen Roboter vor, der solche Operationen mit hoher Geschwindigkeit und Präzision durchführen kann. Auf einem Bildschirm direkt neben dem offenen Mund des Patienten zeigt das neue Computersystem auf einen Zehntelmillimeter genau in dreidimensionaler Darstellung, wie der Operateur sein Instrument zu führen hat. Gelangt der Bohrer gefährlich nahe an einen Nerv, warnt „RoboDent“ mit akustischen Signalen. Bei der Implantation von Ersatzzähnen ermöglicht der künstliche Navigator erstmals, mehrere Schrauben exakt achsenparallel einzusetzen. Überdies können Zahntechniker anhand der Rechnerdaten weitere Prothesen oder Brücken sehr schnell und präzise herstellen sowie passgenau auf die eingebrachten Implantate montieren. Dank „RoboDent“ sind die neuen Zähne schon innerhalb einer Woche voll belastbar. Zudem genügt es bei dieser Methode, ein kleines Loch im Zahnfleisch auszustanzen.



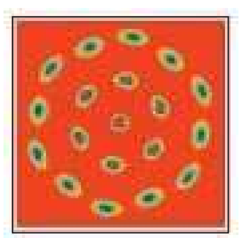
TIM LÜTH / UNIVERSITÄTSKLINIKUM CHARITÉ

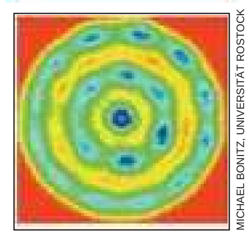
Per Computer-Navigator werden Ersatzzähne präzise implantiert.

PHYSIK

Bizarre Elektronenkristalle

Schon 1934 sagte Eugene P. Wigner die Existenz bizarrer Kristalle voraus, die ausschließlich aus Elektronen bestehen. Ihr Nachweis gelang erst 40 Jahre später auf der Oberfläche winziger Heliumtröpfchen. Jetzt hat ein deutsch-russisches Team um Alexei Filinov und Michael Bonitz von der Universität Rostock mit einem Computermodell erkundet, wie die Elektronenkristalle entstehen. Die Forscher simulierten ein elektrisches Feld, das bis zu 20 Elektronen entgegen ihrer wechselseitigen Abstoßung auf einer Kreisfläche zusammensperrte. Wie sich zeigte, ordnen sich die Teilchen in konzentrischen Schalen an. Dabei schwingen sie um Gleichgewichtspositionen und können sogar von einem Platz zum anderen springen. Werden sie gekühlt, gefriert das zuvor noch flüssige Ensemble zu einem Kristall, dessen Gitterplätze die Elektronen nicht mehr verlassen. Denselben Effekt hat eine verstärkte Kompression durch das äußere Feld. Wird jedoch der Druck zu groß, durchdringen sich die Elektronenwolken gegenseitig – bis der Kristall wieder schmilzt. Und schließlich konnten die Forscher sogar durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Teilchen die Kristallbildung beeinflussen. Die Resultate eignen sich als Rezept, um die Beweglichkeit einer Hand voll Elektronen gezielt zu steuern. Sie eröffnen damit neue Möglichkeiten zum Bau winziger elektronischer Schaltelemente. *(Physical Review Letters, Bd. 86, S. 3851)*





MICHAEL BONITZ, UNIVERSITÄT ROSTOCK

Auch ein Kristall aus Elektronen (oben) kann schmelzen (unten).

INDUS-ARCHÄOLOGIE

Fisch für Harappa

Über die antike Kultur im Industal wissen Archäologen noch wenig. Doch bildliche Darstellungen, Knochenfunde und Netzreste erzählen vom Fischfang als wichtiger Nahrungsquelle.

Von Dietrich Sahrhage

Fast geräuschlos gleitet ein Schilfboot über das Wasser. Der Morgen ist noch jung, nur vereinzelt raschelt ein Vogel oder anderes Wild im dichten Bewuchs des Flachwassers. Einen Speer zum Stoß bereit, verfolgt der Fischer mit den Augen einen großen Wels, der dicht am Grund eines der unzähligen Seitenarme des Indus entlang schwimmt. Bald wird die Sonne vom Himmel brennen, dann erschweren Lichtreflexe die Jagd. Mit seinen Angeln hat der Fischer schon ein paar kleinere Barben gefangen, dieser kapitale Kerl soll die Arbeit krönen. Rasch wirft er noch einen Blick auf eine Gruppe von Kollegen. Sie haben ein langes Netz vom Ufer aus um einen Fischschwarm im offenen Wasser gelegt. Jetzt sind sie dabei, es auf den Strand zu ziehen. Gemeinsam mit ihnen wird er später die Beute schlachten und zerteilen, anschließend in einer Salzlake konservieren, damit sie im heißen Klima nicht verdirbt. Einen Augenblick träumt er von den Dingen, die man in der nächsten Stadt für den Salzfisch einhandeln kann. Doch Achtung: In diesem Moment schwimmt der Wels frei unter ihm und der Fischer stößt zu.

Solche Szenen könnten sich vor rund 5000 Jahren wirklich im heutigen Pakistan abgespielt haben. Im Industal und in Küstenbereichen entstand eine Zivilisation, die nach der wichtigsten Ausgrabungsstätte als Harappa-Kultur bekannt ist (SdW 10/1980, S. 60). Zur gleichen Zeit blühten auch die Stadtstaaten Mesopotamiens und das pharaonische Reich Ägyptens auf (SdW 4/1999, S. 42).

Den Alltag der Menschen jener Kultur verstehen die Archäologen mittlerweile recht gut, Staatswesen und Religion hingegen kaum, denn die Indusschrift bleibt ein Rätsel. Reliefs und Wandbilder, wie in Ägypten und Mesopotamien üblich, haben jene Menschen nicht hinterlassen. Geblieben sind Teile ihrer schachbrettartig angelegten Städte mit Häusern aus Lehmziegeln, kunstvolle Töpferwaren, Werkzeuge, Schmuck und Gebrauchsgegenstände. Und Reste ihrer Nahrung.

Harappa und Mohenjo-daro im heutigen Pakistan waren bedeutende Zentren dieser Kultur, eine weitere Stadt graben Archäologen derzeit bei Dholavira im indischen Bundesstaat Gujarat aus. Wer organisierte deren hoch entwickelte Waserwirtschaft, die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln und den Handelsverkehr? Waren es Mitglieder einer Adelskaste oder Priester? Wir wissen es nicht. Ein festes System von Längen- und Gewichtsmaßen sowie der recht einheitliche Stil der in Werkstätten gefertigten Gegenstände lassen sich ohne ein leistungsfähiges Staatswesen aber kaum erklären. Die Zeiten scheinen relativ friedlich gewesen zu sein, denn Hinweise auf kriegerische Auseinandersetzungen sind selten. Tempel oder andere religiöse Stätten konnten bislang noch nicht



FOTOS: G. HELMES, AACHEN



Eine in Mohenjo-daro gefundene Keramik aus Terrakotta – vermutlich ein Amulett – zeigt ein Flussboot der Harappa-Kultur. Heutige Hausboote von Flussnomaden auf dem Indus sehen dem sehr ähnlich.

identifiziert werden. Doch Menschen oder Tiere symbolisierende Figurinen und mythologische Darstellungen auf Stempelsiegeln lassen auf einen Glauben an eine andere Welt schließen, ebenso wie das Bestatten der Toten mit Grabbeigaben.

Ähnlich wie in Ägypten der Nil und in Mesopotamien Euphrat und Tigris führte der Indus aus den Bergregionen riesige Mengen von Schlamm heran, die sich in der Ebene absetzten und fruchtbare Böden bildeten. Er konnte allerdings auch große Überschwemmungen und Verwüstungen anrichten. Auf den Feldern gediehen Weizen und Gerste, um deren Anbau die Menschen der Region seit dem Ende der Steinzeit wussten. Funde alter Samen erzählen uns aber auch, dass Sesam, Linsen und Weintrauben auf den Tisch kamen. Darüber hinaus wuchsen Flachs und Baumwolle auf den Feldern, aus ihren Fasern webten geschickte Hände Stoffe für ihre Kleidung und knüpften Fischnetze.

Die zahlreichen Altarme und Überlaufbecken des Indus ebenso wie das Mündungsgebiet und die benachbarten Küsten des Arabischen Meeres waren reich an Fischen und anderem Wassergetier. Zwar züchteten die Menschen schon Schwein, Schaf, Ziege und Rind, sicherlich jagten sie auch allerlei Wild und Wasservögel, doch Fische, Krebse und Mollusken boten eine üppige, scheinbar nie versiegende Quelle für tierisches Eiweiß. Die Bedeutung des Fischfangs veranlasste denn auch manchen dazu, bei der Bemalung von Tongefäßen und dem Schneiden von Stempelsiegeln entsprechende Motive zu verwenden.

Über die Techniken, die sie beim Fischfang einsetzten, berichten Funde von Fanggeräten, Darstellungen auf Keramikscherben und der Vergleich mit den ▶



G. HELMES, AACHEN

Dieses Stempelsiegel aus Speckstein, gefunden in der antiken Stadt Mohenjo-daro, zeigt oben in der Mitte das Piktogramm eines Fisches, ein häufiges Motiv.

Die Chronik der Induskultur

3000 v. Chr.

• **Industal:** Prä-Harappa-Siedlungen wie Mehrgarh, Amri und Kalibangan.
• **Mesopotamien:** Sumerische Stadtstaaten wie Eridu, Uruk, Ur und Lagasch errichten monumentale Tempelbauten, die Keilschrift wird entwickelt und auf Tontäfelchen geschrieben, Gilgamesch-Epos.
• **Ägypten:** Ober- sowie Unterägypten wachsen zu kultureller Einheit zusammen, Menes begründet die 1. Dynastie, Entwicklung der Schrift und des Kalenders.
• **Kleinasien:** Troia I, ein Dorf mit Umfassungsmauern, wird 2920 v. Chr. gegründet.
• **Iran und Golfregion:** Unter dem Einfluss der sumerischen Kultur entsteht die protoelamische Schrift, Kamele werden domestiziert.

2800 v. Chr.

• **Mesopotamien:** Während der Dschemdet–Nasr–Zeit Entwicklung der Tempelwirtschaften, Herstellung von Bronze.
• **Ägypten:** Baumeister Imhotep, Stufenpyramide von Djoser.
• **Nordeuropa:** Der Bau von Stonehenge beginnt.

2600 v. Chr.

• **Industal:** Beginn der Blütezeit von Harappa, Mohenjo-daro und anderen Städten (bis etwa 1900 v. Chr.).
• **Mesopotamien:** Königsgräber von Ur.
• **Ägypten:** Altes Reich mit Hauptstadt Memphis, unter Pharao Cheops entsteht die erste Pyramide von Giseh.
• **Kleinasien:** Troia II wird als Fürstensitz erbaut; aus dieser Zeit stammt der „Schatz des Priamos“.

2300 v. Chr.

• **Industal:** Handelsbeziehungen mit Mesopotamien und Magan (Oman).
• **Mesopotamien:** Sargon I. gründet das Großreich von Akkad.
• **Ägypten:** Die 6. Dynastie bringt wachsende Unabhängigkeit für die Provinzen und schließlich den Zusammenbruch des Alten Reiches.
• **Kleinasien:** Troia wächst und gedeiht.

1700 v. Chr.

• **Industal:** Die letzten Städte werden von ihren Einwohnern verlassen, Ende der Kultur.
• **Mesopotamien:** In Babylon erlässt Hammurabi seinen Gesetzes-Codex, seine Truppen zerstören den Palast von Mari (1759 v. Chr.).
• **Ägypten:** Zerfall des Mittleren Reiches mit rasch wechselnden Herrschern und Kulturkrise, ab 1650 v. Chr. Fremdherrschaft der „Hyksos“, asiatischer Bevölkerungsteile des östlichen Nildeltas.
• **Kleinasien:** Troia VI wird als große Burganlage neu errichtet.
• **Europa:** Auf dem griechischen Festland und in der Ägäis entstehen die Reiche der Mykener und der Minoer (Kreta).

heutigen Praktiken der Bewohner dieser Landstriche. Angelhaken aus Kupfer, Pfeil- und Speerspitzen fanden Archäologen in den Hochburgen jener Zivilisation, im Binnenland wie auch an der Küste. Das Kupfer für diese Geräte wurde vor allem in den antiken Minen von Khetri im heutigen Indien, rund 400 Kilometer südöstlich von Harappa gewonnen, wie man mittlerweile aus archäologischen Funden sowie chemischen Analysen der Metallbeimengungen weiß. Auch aus dem heutigen Oman, das damals Magan hieß, wurde Kupfer importiert.

Dass auch Netze geknüpft und vielfach benutzt worden sind, verraten steinerne und tönerne Gewichte, wie sie Fischer noch heute verwenden. Diese Gewichte beschwerten die unteren Leinen der Netze, die oben an Schwimmkörpern aus Holz oder Ried hingen und so als Wände senkrecht im Wasser gehalten wurden. Die Netze und ihre Schwimmkörper sind natürlich längst vergangen, wie auch die Reusen, korbähnliche Geflechte, deren Öffnungen sich immer mehr verjüngen, sodass Fische zwar hinein schwimmen können, aber kaum wieder heraus finden. Doch Scherben bemalter Keramik zeigen Menschen, die solche Geräte in den Händen halten. Umso spektakulärer war der Fund von Resten eines fast 5000 Jahre alten Fischnetzes in Shar-i Sokhta, einer noch heute bestehenden Siedlung an einem abflusslosen See im iranisch-afghanischen Grenzgebiet. Wollfäden waren mit Kreuzknoten kunstvoll zu einem Netz mit vier Zentimeter weiten Maschen verbunden worden. Glücklicherweise blieb dieses Artefakt im wüstenartigen Trockenklima der Seistan-Senke über Jahrtausende erhalten.

Auch über die zum Fischfang benutzten Boote berichten alte Darstellungen. Beispielsweise zeigt ein Terrakotta-Amulett ein Schiff mit flachem Boden und hoch aufragenden Enden, zwei großen Steuerrudern am Heck und einem Haus oder Zelt in der Mitte (siehe Bild Seite 28). Die heute *Mohanas* genannten Flussnomaden auf dem Indus und dessen Überlaufbecken, die manche Forscher für die unmittelbaren Nachkommen der Menschen der alten Induskultur halten, benutzen Hausboote ähnlicher Bauweise. Vielleicht gab es auch Fahrzeuge aus

Französische Forscher entdeckten 1989 den als Prahag bezeichneten Fundplatz tausender Fischknochen und Tonscherben aus der Harappa-Zeit vor über viertausend Jahren.



JEAN DESSE, VALBONNE, FRANKREICH

Schilf wie in Mesopotamien; Handelsbeziehungen hätten einen solchen „Techniktransfer“ wohl erlaubt, doch die Boote hätten die Jahrhunderte nicht überdauert. Schließlich belegen kleine, aus Terrakotta gefertigte Bootsmodelle, dass die Bewohner der Küsten es sehr wohl verstanden, ihre Schiffe mit Kiel, Mast und Segel auszurüsten, um damit auf das Meer zu fahren.

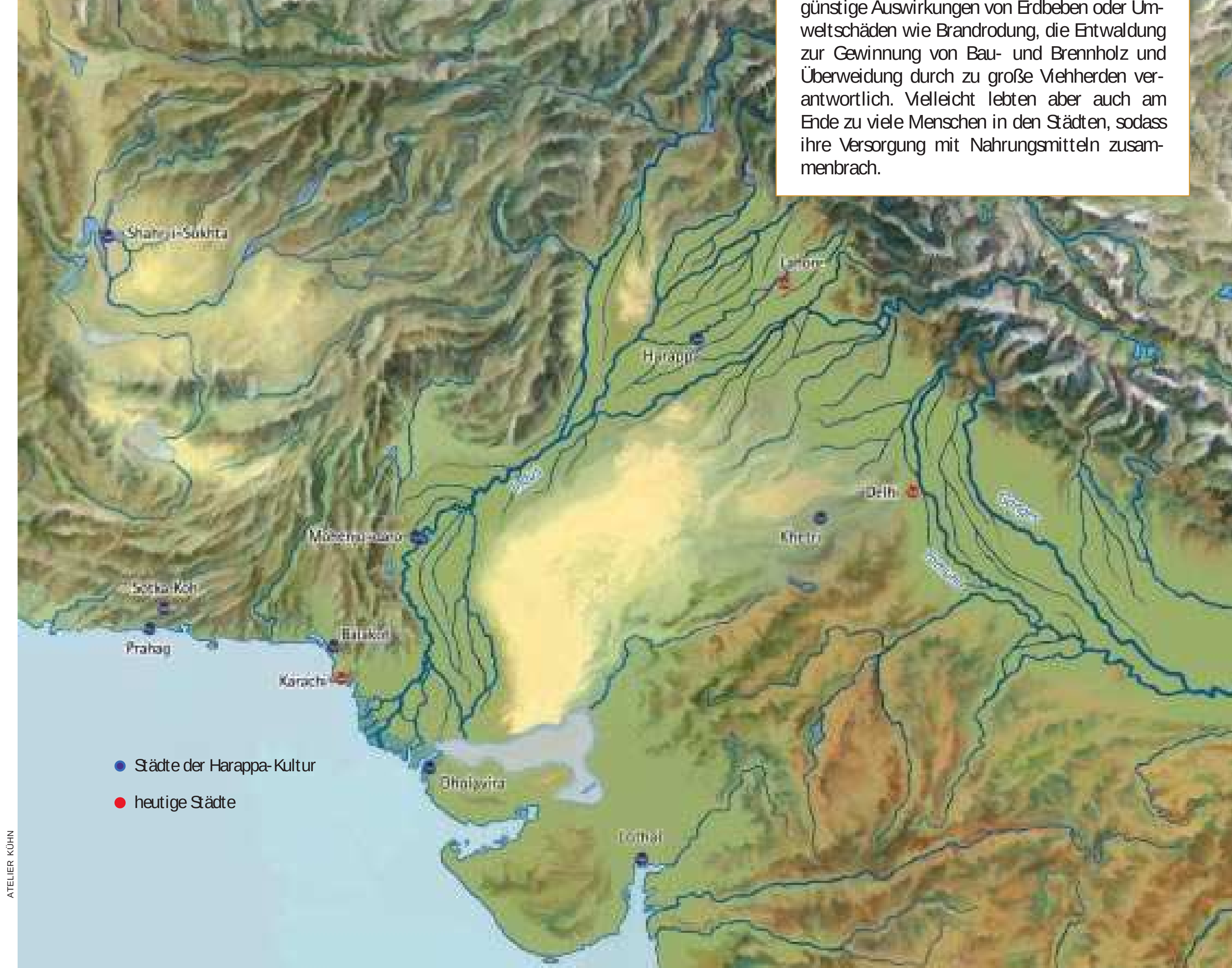
Welche Fischarten haben die Menschen wohl erbeutet? Heutzutage leben in den pakistanischen Binnengewässern mehr als 150 Arten, von denen die meisten zu den Karpfenfischen zählen. Bärblinge und Zierbarben bilden, obwohl sie selten größer als 15 Zentimeter werden, durch ihre schiere Menge eine wichtige Ressource. Große und vorzügliche Speisefische sind Riesenbarben wie Catla und Tomahseer und der Fransenlipper Rohu, die mehr als zwei Meter groß werden können. Diese Länge erreicht auch der räuberische Jagdwels Wallago mit einem Höchstgewicht von 45 Kilogramm.

Archäozoologen haben an vielen Stätten im Landesinneren antike Fischknochen ausgegraben, vor allem Wirbelkörper und Schädelteile. Aus diesen Speiseresten und Schlachtabfällen der Harappa-Kultur bestimmen sie Arten und Größen der verwendeten Tiere. Offensichtlich hat sich an der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften in den Binnengewässern Pakistans in den letzten 5000 Jahren nicht sonderlich viel verändert. Sogar das Lebensalter der Tiere lässt sich feststellen: Otolithen genannte kleine artspezifische Kalksteine des Gleichgewichtssinnes im Kopf von Knochenfischen zeigen jährliche Zuwachszonen, vergleichbar den Jahresringen im Holz, die sich auszählen lassen.

Für die Fauna der Küstengewässer gibt es ähnliche Befunde: Sie hat sich kaum verändert. Durch einen Zufall entdeckten französische Archäologen 1989 an der Makran-Küste in Prahag, einem Gebiet bei der heutigen Stadt Pasni, etwa 800 Meter vom heutigen Meeresstrand entfernt einen 120 mal 15 Meter großen Flecken, den eine hohe Wanderdüne wieder freigegeben hatte. In der von wenigen dürren Sträuchern bewachsenen Dünenlandschaft lagen Tausende von Fischknochen und Otolithen, die der Sand jahrhundertelang bedeckt, konserviert ▶

Rätselhafte Hochkultur am Indus

Die Harappa-Kultur, benannt nach der seit 1921 ausgegrabenen Stadt Harappa am Ravi, einem Nebenfluss des Indus, erlebte ihre Blütezeit von 2600 bis 1900 v. Chr. Ihre Spuren sind von Belutschistan in Pakistan bis Rajastan in Indien und von den Bergen des Himalaya bis zu den Küsten des Arabischen Meeres zu finden. In mühsamer Arbeit haben Archäologen bislang mehr als tausend Städte und Siedlungen freigelegt oder zumindest identifiziert. Um 1700 v. Chr. ging diese hochentwickelte Kultur unter. Die Gründe dafür sind immer noch ein Rätsel. Manche Forscher suchen die Ursache in Veränderungen des Klimas, andere machen ungünstige Auswirkungen von Erdbeben oder Umweltschäden wie Brandrodung, die Entwaldung zur Gewinnung von Bau- und Brennholz und Überweidung durch zu große Viehherden verantwortlich. Vielleicht lebten aber auch am Ende zu viele Menschen in den Städten, sodass ihre Versorgung mit Nahrungsmitteln zusammenbrach.



ATELIER KÜHN

G. HELMES, AACHEN

Wie ihre Vorfahren legen Fischer auf dem Indus Netze aus. An der Wasseroberfläche sieht man nur das dicke Schilfseil, an dem die Netzwand hängt. Zunehmende Wasserverschmutzung könnte die Tradition beenden.

und in ihrer Lage fixiert hatte, dazu Scherben antiker Tongefäße aus der Harappa-Zeit! Die meisten Knochen stammen von großen Kreuzwelsen, Umberfischen, Grunzern, Rochen und kleinen Haien, die auch heute noch den Fischern an den Küsten des Arabischen Meeres ins Netz gehen. Dass sich Reste solcher Tiere auch noch im Landesinneren fanden, etwa in Miri Qalat, einer heutigen Stadt 120 Kilometer nördlich von Prahag, und ebenso rund 900 Kilometer von der Küste entfernt in Harappa selbst, lässt nur eine Erklärung zu: einen gut funktionierenden Handel der Küstenbewohner mit den Städten im Inland.

Eine Voraussetzung dafür waren Verfahren, die verderbliche Ware gut zu konservieren. Die Fischer Belutschistans kennen ein solches Verfahren: Sie köpfen die Fische, spalten sie der Länge nach und legen die Hälften dann für zwei bis drei Tage in ein rundes, mit einer Salzlake gefülltes Loch im Boden; anschließend wird der Fisch für mindestens eine Woche zum Trocknen der Sonne ausgesetzt.



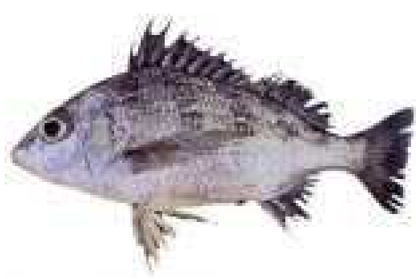
INSTITUTO ITALIANO PER L´AFRICA E L´ORIENTE, ROM

Dieser Fund war eine Sensation: Im Trockenklima der Seistan-Senke blieben Reste eines Netzes aus der Zeit um 2900 v. Chr. erhalten, das zum Fisch- oder Vogelfang verwendet worden ist.

Die Knochen in Prahag lagen in einer auffälligen Anordnung, nämlich in einer Reihe von runden Zonen mit fünf bis acht Metern Durchmesser. Hatten die Fische dort in Salzlaken gelegen? Auch Schnittmarken an antiken Wirbelkörpern des Sua-Fisches, die man andernorts, im heutigen Balakot nahe der Küste nordwestlich von Karachi, entdeckte, sprechen eine deutliche Sprache: Das Tier war der Länge nach gespalten und in Stücke geschnitten worden; heutige Trockenfische zeigen die gleichen Merkmale.

Flüsse, Seen und Meer boten den Menschen der Induskultur aber nicht nur Fische, sondern auch reiche Vorkommen an Krebsen, Muscheln und Schnecken. Die harten Schalen der Mollusken blieben über Jahrtausende gut erhalten. Schon am Ende der Steinzeit hat man sie in der Umgebung des Industals zu ▶

Schmuck und Haushaltsgegenständen wie Gefäßen oder Löffeln verarbeitet. Zur Harappa-Zeit gab es an vielen Orten regelrechte Werkstätten, die fast alle nach recht einheitlichen Techniken und Stilen arbeiteten. Dabei nutzten sie vor allem die Gehäuse von Meeresschnecken, die ebenfalls von den Küsten in die großen Zentren des Binnenlandes transportiert wurden. Aus großen Stachelschnecken fertigten tüchtige Handwerker Löffel, die den Toten mitgegeben wurden. Möglicherweise haben Priester damit in einem Ritus geheiligte Flüssigkeiten verteilt und sie dann den Toten mit ins Grab gelegt. Gehäuse der Fingerschnecke benutzte man als Behälter, stellte Spielfiguren aus ihnen her oder verwendete Bruchstücke bei Einlegearbeiten. Vor allem lieferten die Werkstätten Armreife, Ringe und Perlen aus Schneckenschalen, die als Schmuck und Amulette weit verbreitet waren. Im Binnenland gelangten die Erzeugnisse über ein ausgedehntes Handelsnetz bis in den Iran und nach Afghanistan, wo sie gegen Gold, Zinn und Halbedelsteine wie Lapislazuli getauscht wurden.



Aus den Gehäusen der Sankha- und der Spindelschnecke arbeiteten die Handwerker mit feinen Bronzesägen und Bohrern die zentrale Spindel (Columella) heraus. Daraus fertigten sie Hohlzylinder als Rohlinge für Rollsiegel. Auf dem Seeweg brachten Händler diese nach Oman und Mesopotamien. Funde der Columella von Sankhaschnecken in Mesopotamien belegen die Handelsbeziehungen zwischen dem Industal und Mesopotamien, denn das Tier hat vor der Makran-Küste seine äußerste westliche Verbreitungsgrenze und wird im Arabisch-Persischen Golf nicht gefunden.

In Lothal, einer kleinen antiken Stadt im heutigen Indien nahe dem Golf von Cambay, fanden Archäologen Werkstätten zur Verarbeitung von Meeresschnecken, Kupfer und Keramik, dazu ein etwa 214 mal 36 Meter großes, mit Mauerwerk aus gebrannten Ziegeln gebautes Wasserbecken, das an einem Ende eine Art Einfahrt, am anderen einen verschließbaren Wasserablauf besaß. Einige Wissenschaftler vermuten, dieses Becken habe mit der angrenzenden Ziegelplattform und einem recht großen „Lagerhaus“ als Hafenanlage für Seeschiffe gedient. Funde mariner Molluskenschalen und einiger „Ankersteine“ im Becken stützen diese Ansicht. Vielleicht war Lothal einer jener Häfen, von denen aus mutige Handelsfahrer zu den Kunden in Mesopotamien in See stachen.

Und dort gibt es denn auch schriftliche Berichte über die Harappa-Kultur.



Keilschriftaufzeichnungen auf Tontäfelchen vermelden nämlich, der Herrscher Sargon I. (um 2300 v. Chr.) habe verfügt, dass Schiffe aus „Meluhha“, wie das Indusgebiet damals vermutlich genannt wurde, über Ur hinaus auf dem Euphrat in seine Hauptstadt Akkad kommen sollten, um dort Ladung zu löschen. Auf einem Rollsiegel ist der König mit einem Dolmetscher aus Meluhha abgebildet. Außer Kupfer, Gold, Lapislazuli und Holz verzeichneten die Täfelchen auch Produkte aus Schneckenschalen als Fracht. Auch Inschriften, die Gudea, der Herrscher von Lagasch im Lande Sumer, rund 200 Jahre nach Sargon I. am Tempel anbringen ließ, berichten, man habe für den Bau wertvolle Rohstoffe aus Meluhha eingeführt.

Welche Waren erhielten die Händler im Gegenzug? Hinweise in Wirtschaftstexten auf Tontafeln deuten auf Export von Getreide, Ölen, Wolle und Textilien sowie von Silberbarren zur Bezahlung der Einfuhren hin. Möglicherweise wurde auch zu Blöcken gepresstes Fischmehl nach Meluhha versandt, um die dortige Produktion zu ergänzen.



Über zwei Meter lang wird der Jagdwels (oben, *Wallago attu*), ein Speisefisch. Auch der Kreuzwels (Mitte links, *Arius thalassimus*) und der Dhoter (unten links, *Pomadasys hasta*) dienten in der Induskultur als Speise.

DHOTER UND KREUZWELS AUS DEM WERK VON T. GLOERFELT-TARP UND P. J. KAILOLA: ‚TRAWLED FISHES OF SOUTHERN INDONESIA AND NORTHWESTERN AUSTRALIA‘; JAGDWELS: JOHNNY JENSEN, WWW.JJPHOTO.DK

Die Handelsbeziehungen zwischen dem Industal und Mesopotamien werden auch durch typische Stempelsiegel der Harappa-Kultur bewiesen, die man in mehreren Städten Mesopotamiens gefunden hat. Nach dem Ende des Reiches von Akkad scheinen die unmittelbaren Verbindungen abgerissen zu sein. Der Handel lief nun über Dilmun auf den Bahrain-Inseln und Magan (Oman) als Zwischenhandelsstationen, bis um 1700 v. Chr. die Induskultur aus unbekannten Gründen unterging.

Doch mögen auch für Jahrhunderte keine großen Städte mehr errichtet worden sein, ihre Kenntnisse im Umgang mit den Ressourcen des Indus und der Küstengewässer haben die Menschen im Indusgebiet bis heute bewahrt. Erst die „Nebenwirkungen“ moderner Kultur drohen dies zu ändern: Noch leben rund 50 000 *Mohanas* in ihren Hausbooten auf dem Manchhar-See, einem großen Überlaufbecken des Indus, doch mehr und mehr verlassen ihre Heimat, da städtische Abwässer, Salze, Pestizide und Düngemittel die Fischfänge um 80 Prozent reduziert haben und das Trinkwasser vergiften. ■

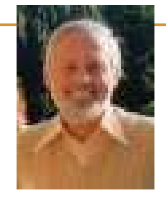
Literaturhinweise

Die Indus-Zivilisation. Wiederentdeckung einer frühen Hochkultur. Von Michael Jansen, DuMont, Köln, 1986.

En rond ou en long? Aires de découpes de poissons du littoral Balouche (Makran Pakistanais). Von Jean Desse und Roland Besenval, in: Anthropozoologica 21 (1995), S. 163.

A Baluchi Fishing Village. Von William R. Belcher, www.harappa.com

Weitere Hinweise zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*



Der Fischereibiologe ***Dietrich Sahrhage*** *arbeitete lange Jahre in der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen in Rom. Von 1974 bis 1988 war er Direktor des Instituts für Seefischerei der Bundesforschungsanstalt für Fischerei in Hamburg und hielt an der dortigen Universität Vorlesungen zur Fischwirtschaft. Er ist Autor mehrerer Bücher zur Geschichte der Fischerei.*

Der steinige Weg

Außer Luft und Wasser war Gestein der einzige Rohstoff auf der Früherde. Offenbar haben bestimmte Minerale bei der Entstehung irdischen Lebens eine entscheidende Rolle gespielt.

Von Robert M. Hazen

Niemand weiß, wie auf der urtümlichen Erde Leben entstand, aber eines ist sicher: Der Ursprung des Lebens war ein chemischer Vorgang. Nachdem unser Planet sich vor 4,5 Milliarden Jahren gebildet hatte, wurde seine Oberfläche noch eine halbe Milliarde Jahre lang unablässig durch Asteroideneinschläge erschüttert und sterilisiert. Dennoch tauchte dann binnen einiger hundert Millionen Jahre bereits eine Vielfalt mikroskopischer Lebensformen auf. Irgendwann zuvor muss sich das erste Lebewesen gebildet haben – aus Luft, Wasser und Gestein.

Unter diesen drei Rohstoffen haben in hypothetischen Szenarien der Lebensentstehung lange Zeit die Atmosphäre und die Ozeane Hauptrollen übernommen; das Gestein und die Minerale, aus denen es besteht, durften nur als Stichwortgeber oder stumme Statisten mitwirken. Doch nun erkennen die Wissenschaftler dies als Irrtum. Wie zahlreiche faszinierende Experimente belegen, waren Minerale an den grundlegenden chemischen Reaktionen, aus denen das Leben hervorging, aktiv beteiligt.

Im ersten Akt des Dramas der Lebensentstehung müssen Ansammlungen kohlenstoffhaltiger Moleküle aufgetreten sein, die sich selbst zu kopieren vermochten. Bereits dieser allererste Schritt der Evolution setzte eine Abfolge chemischer Umwandlungen voraus, die einer Gruppe organischer Moleküle sukzessive immer komplexere Strukturen verlieh. Die häufigsten Kohlenstoffverbindungen auf der urtümlichen Erde waren Gase mit nur einem Kohlenstoffatom pro Molekül, nämlich Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Methan. Aber die wichtigsten Bausteine lebender Organismen – energiereiche Zuckerarten, membranbildende Lipide und komplexe Aminosäuren – können über ein Dutzend Kohlenstoffatome pro Moleküle enthalten. Viele dieser Moleküle müssen sich ihrerseits zu Polymerketten und anderen Molekülanordnungen verbinden, damit die chemischen Voraussetzungen für Leben geschaffen werden. Das Kombinieren kleiner Moleküle zu komplexen, ausgedehnten Strukturen muss unter den rauen Bedingungen der Früherde besonders schwierig gewesen sein, denn die intensive Ultraviolettstrahlung spaltete Molekül-Cluster fast so schnell auf, wie sie sich bilden konnten.

Minerale als aktive Mitspieler

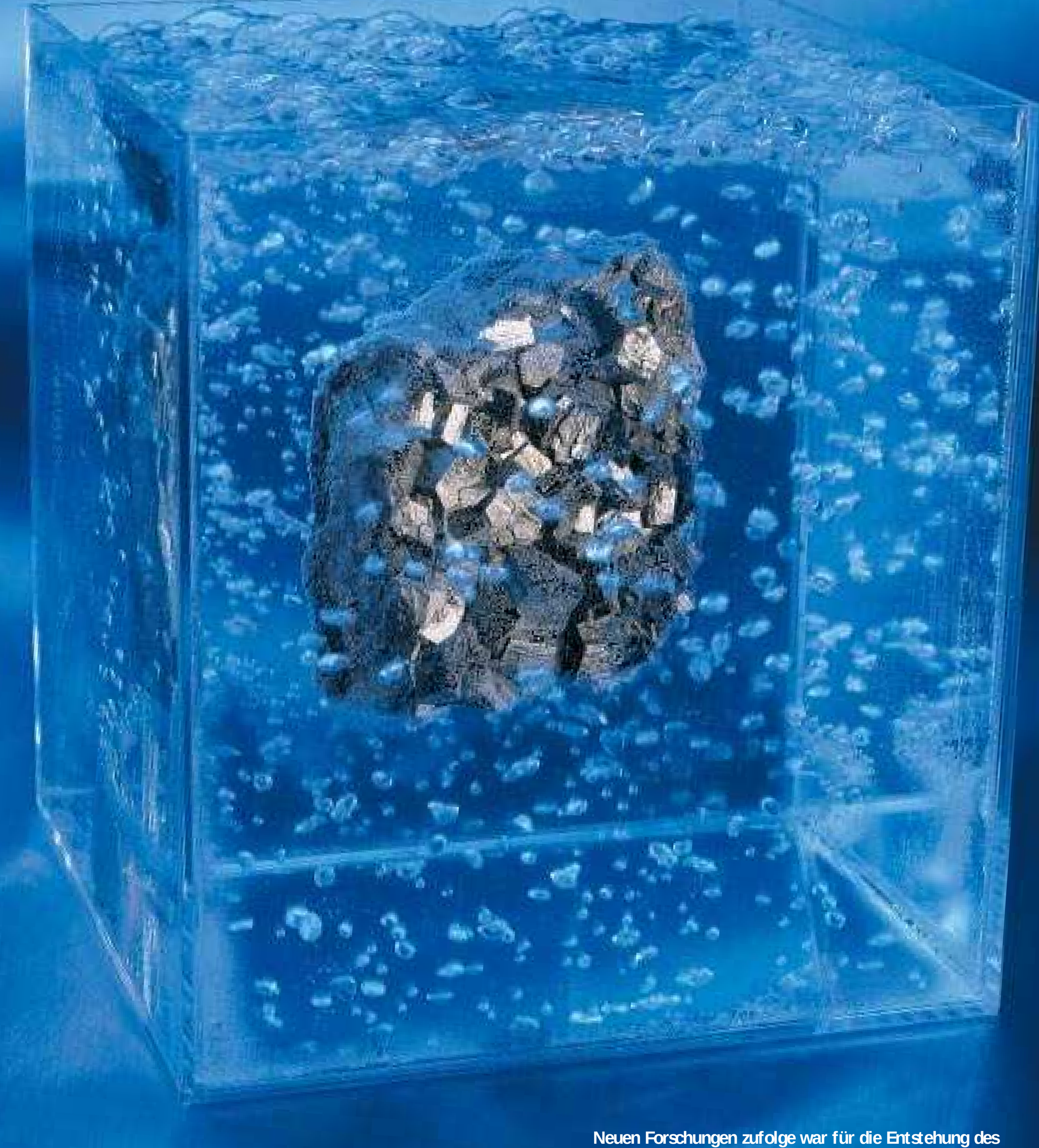
Darum brauchten die kohlenstoffhaltigen Moleküle Schutz und Hilfe. In der Tat können Minerale mindestens fünf wichtige Funktionen – vom passiven Statisten bis zum aktiven Mitspieler – bei lebenswichtigen chemischen Reaktionen übernehmen. Winzige Kammern im Mineralgefüge bieten einfachen Molekülen Unterschlupf, während die Mineraloberfläche das Gerüst zu liefern vermag, auf dem diese Moleküle sich zusammenfügen und wachsen. Außerdem können die Kristallflächen bestimmter Minerale aktiv spezielle Moleküle auswählen, die den zum Leben notwendigen gleichen. Die Metall-Ionen in anderen Mineralen können Reaktionen auslösen, die in ähnlicher Form einst einfache Moleküle in selbst-replizierende Gebilde umgewandelt haben müssen. Vielleicht am überraschendsten sind die kürzlich gefundenen Anzeichen, dass Elemente von gelösten Mineralen in biologische Moleküle eingebaut werden können. Demnach haben Minerale nicht nur Biomolekülen geholfen, einander zu finden, sondern sind vielleicht sogar selbst Teil des Leben geworden.

Nach Charles Darwins „Entstehung der Arten“ von 1859 spekulierten die Naturforscher fast ein Jahrhundert lang über die chemischen Vorstufen zum Leben. Einige erwähnten in ihren fantasievollen Szenarien sogar Gesteine und Mineralien, aber nur selten stützten sich diese Spekulationen auf empirische Befunde.

Es dauerte bis Mitte des 20. Jahrhunderts, ehe erste grundlegende Experimente durchgeführt wurden. In einem der berühmtesten versuchte 1953 Stanley L. Miller, ein begabter Doktorand des Chemikers Harold C. Urey an der Universität Chicago, in einer Flasche die Ozeane und die Atmosphäre der Urerde nachzuahmen. Miller schloss Methan, Ammoniak und andere Gase, die man für Bestandteile der frühen Lufthülle hielt, in einem teilweise mit Wasser gefüllten Glasbehälter ein. Als er elektrische Funken durch das Gas zucken ließ, um Gewitter zu imitieren, färbte sich das klare Wasser erst rosa, dann braun: Dabei reicherte es sich, wie die anschließende Analyse ergab, mit Aminosäuren und anderen grundlegenden organischen Molekülen an. Mit diesem einfachen und eleganten Versuch verwandelte Miller die zuvor rein spekulative Erforschung des Lebensursprungs in exakte experimentelle Wissenschaft. Die Sensationspresse meldete gleich, demnächst würden synthetische Käfer aus den Teströhrchen kriechen. Aber auch besonnene Forscher meinten, das größte Hindernis für die Erschaffung von Leben im Labor sei nun beseitigt.

Doch solche Erwartungen waren von kurzer Dauer. Miller hatte zwar eine Möglichkeit entdeckt, aus Wasser und Gas der Urerde viele Lebensbausteine herzustellen, aber nicht, wie oder wo die-

zum Leben



ALLE FOTOS: ROBERT LEWIS

Neuen Forschungen zufolge war für die Entstehung des Lebens auf unserem Planeten mehr erforderlich als nur Wasser und Luft: Auch das Gestein der Urerde spielte eine aktive Rolle bei der Bildung der ersten Biomoleküle.

se einfachen Gebilde sich zu den komplexen molekularen Strukturen – wie Proteinen und der Erbsubstanz DNA – zusammenfügten, ohne die es kein Leben auf Erden gäbe.

Um dieses Rätsel zu lösen, zogen Miller und andere Forscher Felsen als Statisten in Betracht. Vielleicht, so spekulierten sie, gerieten im Meerwasser treibende organische Moleküle in Gezeitentümpel an Felsenküsten. Durch wiederholte Verdunstungszyklen seien diese Moleküle immer stärker konzentriert worden – wie Suppe, die auf kleiner Flamme langsam eindickt.

Lebensentstehung in der Tiefsee?

In den letzten Jahren vermuten die Forscher allerdings, die Lebensbausteine hätten sich in viel kleineren Behältern angesammelt. Einige Gesteine, etwa vulkanischer grauer Bimsstein, enthalten unzählige Hohlräume, die durch Expansion von Gasen im noch zähflüssigen Gestein entstanden. Und viele Minerale, zum Beispiel Feldspat, entwickeln durch Verwittern mikroskopisch kleine Vertiefungen. Jede winzige Kammer in jedem Stein der Früherde könnte ein eigenes Experiment zur molekularen Selbstorganisation beherbergt haben. Mit genügend viel Zeit und genügend vielen Kammern erzeugte der Zufall eine Molekülkombination, die letzten Endes die Bezeichnung „lebendig“ verdiente.

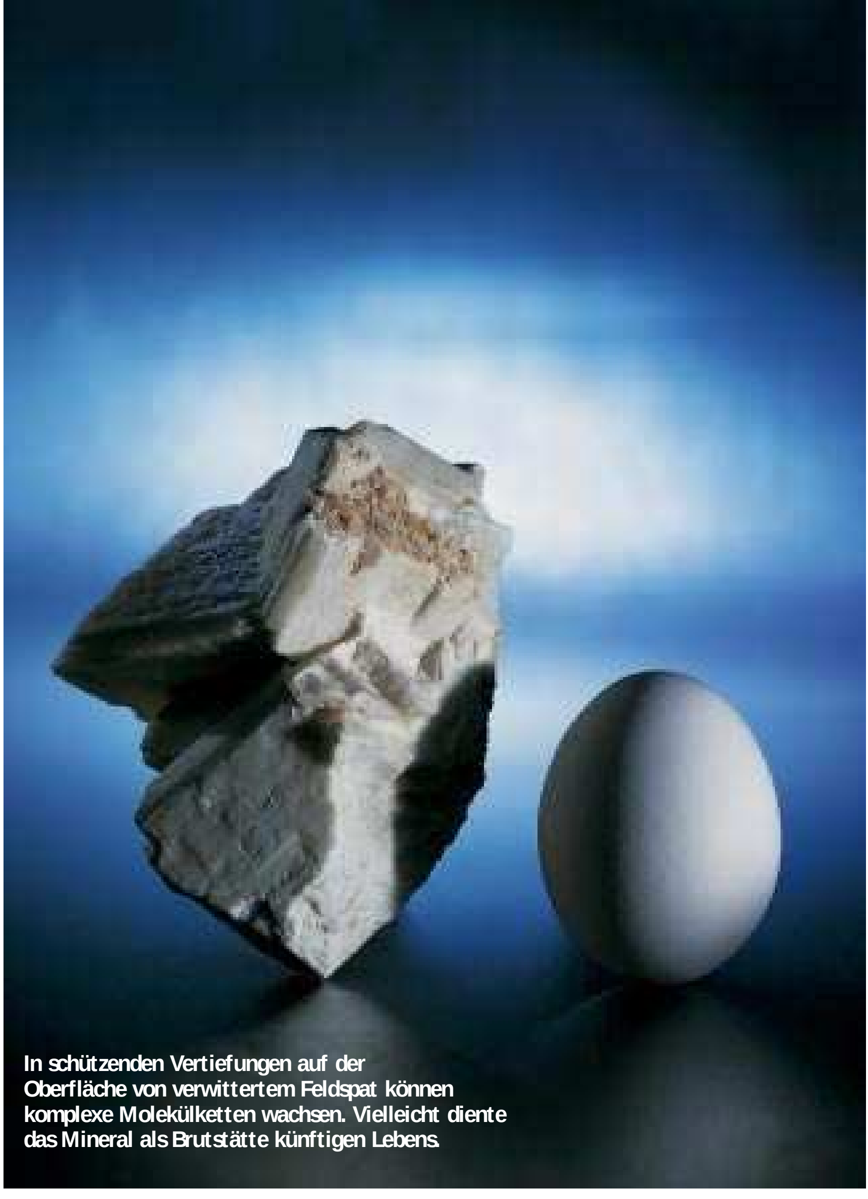
Solchen Spekulationen lag die Meinung zu Grunde, Leben sei so zerbrechlich, dass es zu seinem Schutz auf Felsgestein angewiesen sei. Doch 1977 stellte eine verblüffende Entdeckung alle gängigen Ansichten über die Hinfälligkeit des Lebens – und möglicherweise über seinen Ursprung – in Frage. Bis dahin hatten die meisten Forscher angenommen, das Leben sei an oder knapp unterhalb der Meeresoberfläche als Ergebnis chemischer, vom Sonnenlicht angetriebener Prozesse entstanden. Diese Annahme wurde erschüttert, als Tiefseeforscher verschiedene Ökosysteme fanden, die an den heißen Mündungen unterseeischer Vulkanschlote gediehen. Dass solch extreme Umgebungen – fernab von jedem Sonnenstrahl – differenzierte Gemeinschaften von Lebewesen unterhalten können, hätte bis dahin niemand für möglich gehalten. In diesen dunklen Regionen beziehen die Organismen den Großteil der lebensnotwendigen Energie von der Erdwärme.

Das brachte einige Forscher auf die Idee, organische Reaktionen, die zur Lebensentstehung beitrugen, könnten unter großer Hitze und enormem Druck in solchen hydrothermalen Schloten stattgefunden haben. Miller und seine Mitarbeiter wenden gegen diese Hypothese unter anderem ein, dass Aminosäuren bei Erwärmung rasch zerfallen. Dieser Einwand gilt aber nur, solange wichtige Minerale außer Acht bleiben.

Entsprechende Experimente wurden kürzlich an meinem Institut, dem Geophysikalischen Labor der Carnegie Institution of Washington, durchgeführt. Dort ging mein Kollege Jay A. Brandes – heute am Marine Sciences Institute der Universität von Texas in Port Aransas – als Postdoc-Forscher der Frage nach, ob Minerale die empfindlichen Aminosäuren stabilisieren. 1988 zeigte ein Experiment, dass die Aminosäure Leucin in Wasser unter Druck bei 200 Grad Celsius zwar binnen Minuten zerfällt – wie Miller vorhergesagt hatte. Doch wenn Brandes dem Gemisch ein Eisensulfid-Mineral hinzufügte, wie es häufig in und um hydrothermale Schlote auftritt, blieb die Aminosäure tagelang intakt; damit bot sich reichlich Zeit für Reaktionen mit anderen bedeutsamen Molekülen.

Selbst wenn ein geschützter Ort – sei es ein Gezeitentümpel, ein mikroskopisches Grübchen auf einer Gesteinsoberfläche oder eine Stelle in der Biegung eines Tiefeeschlots – die passenden Rohstoffe enthält, treiben die einzelnen Moleküle allerdings frei im Wasser. Sie brauchen etwas, an dem sie sich festhalten und miteinander reagieren können.

Das könnte beispielsweise die ruhige Oberfläche eines Gezeitentümpels gewesen sein oder vielleicht ein primitiver „Ölschlick“ aus Verbindungen, die auf dem Wasser schwimmen. Doch beides hätte für empfindliche Moleküle ein hohes Risiko bedeutet. Heftige Gewitter und ultraviolette Strahlung, die auf der Früherde viel intensiver war als heute, konnten sie rasch aufbrechen.



In schützenden Vertiefungen auf der Oberfläche von verwittertem Feldspat können komplexe Molekülketten wachsen. Vielleicht diente das Mineral als Brutstätte künftigen Lebens.

FELDSPAT MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY, MIT GENEHMIGUNG DES DEPARTMENT OF EARTH AN PLANETARY SCIENCES

Chemiker mit einem Draht zur Geologie haben früh erkannt, dass die Oberfläche von Mineralen eine interessante Alternative für den Zusammenbau wichtiger Moleküle bieten könnte. Wie die Behälter-Idee ist auch diese Einsicht schon rund fünfzig Jahre alt. Damals vermuteten einige Wissenschaftler, Tone könnten organische Moleküle besonders gut anziehen (Kasten Seite 38/39). Diese allgegenwärtigen Minerale fühlen sich glitschig an, wenn sie nass sind, denn ihre Atome bilden flache, glatte Schichten. Deren Oberflächen sind oft elektrisch geladen und könnten dadurch organische Moleküle anziehen und festhalten. Spätere Experimente bestätigten diese Vermutungen. Ende der siebziger Jahre zeigte eine israelische Forschergruppe, dass Aminosäuren sich auf Tonoberflächen anreichern können und dann kurze Ketten bilden, die Proteinen ähneln. Diese chemischen Reaktionen traten auf, wenn die Forscher eine wässrige Lösung, die Aminosäuren enthielt, aus einem tonhaltigen Gefäß verdunsten ließen – ähnlich dem Austrocknen eines flachen Teichs oder Gezeitentümpels mit lehmigem Grund.

In letzter Zeit haben zwei Gruppen – unter James P. Ferris vom Rensselaer Polytechnic Institute in Troy (US-Bundesstaat New York) sowie unter Gustaf Arrhenius von der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien) – unabhängig voneinander gezeigt, dass Tone und andere geschichtete Minerale eine Vielfalt organischer Moleküle anziehen und zusammensetzen können. Wie das Rensselaer-Team in einer spektakulären Versuchsserie herausfand, eignen sich Tone als Gerüst für die Bausteine der RNA; dieses Molekül übersetzt im lebenden Organismus Erbinformationen in Proteine.

Hätten organische Moleküle sich erst einmal an ein mineralisches Gerüst geheftet, könnten daraus verschiedene Typen komplexer Moleküle entstanden sein. Aber nur einige wenige Auserwählte wurden letztlich in lebende Zellen integriert. Das bedeutet, eine Art Schablone muss diejenigen primitiven Moleküle ausgewählt haben, die biologisch wichtig werden sollten. Wiederum zeigen neuere Experimente, dass Minerale dabei vielleicht eine zentrale Rolle spielten.

Die wohl rätselhafteste Episode der Evolution sorgte dafür, dass sämtliche Organismen eine seltsame Vorliebe für einen Aminosäure-Typ entwickelten. Wie viele andere organische Moleküle kommen Aminosäuren in zwei Formen vor. Beide enthalten die gleichen Atome, sind aber Spiegelbilder voneinander. Das Phänomen heißt Chiralität; der Einfachheit halber bezeichnen die Forscher die beiden Versionen als linkshändig (kurz L) und rechtshändig (D nach lateinisch *dexter* für rechts). Synthese-Experimente wie die von Miller produzieren unweigerlich ausgewogene Mischungen von L- und D-Molekülen, aber in lebenden Organismen dominieren linkshändige Aminosäuren mit fast hundert Prozent.



Minerale mit Schichtstrukturen bieten sich als Gerüst für den Zusammenbau großer Moleküle an.

Selektiert ein Mineral unter den Aminosäuren die Linkshänder?

Zur Erklärung dieses Rätsels sind ein Dutzend Theorien vorgeschlagen worden – manche hausbacken, andere exotisch. Einige Astrophysiker meinen, die Erde sei infolge von Prozessen in der Gas- und Staubwolke, aus der das Sonnensystem hervorging, bereits mit einem Überschuss an L-Aminosäuren entstanden.

Das Hauptproblem bei dieser Theorie ist, dass solche Prozesse in den meisten Fällen nur weniger als ein Prozent Überschuss an L- oder D-Molekülen liefern. Andererseits könnte unsere Welt mit einem 50-zu-50-Gemisch von L- und D-Aminosäuren begonnen haben, und dann sorgte irgendeine wichtige Eigenschaft der physikalischen Umgebung dafür, dass die eine Version bevorzugt wurde. Nahe liegende Kandidaten für diese spezielle physikalische Umwelt sind, wie ich glaube, gewisse Kristallflächen, deren Oberflächenstrukturen sich spiegelbildlich zueinander verhalten (Kasten Seite 38/39).

Im vergangenen Frühjahr sah ich mir Calcit in dieser Hinsicht genauer an; denn dieses häufige Mineral, das unter anderem Kalkstein und Marmor bildet, zeigt oft wunderschöne Paare spiegelbildlicher Flächen. Es ist Bestandteil vieler Weichtier-Schalen, wo es eine enge Bindung mit Aminosäuren eingeht. Darum vermutete ich, Calcit-Flächen könnten chemische Bindungsstellen enthalten, die zwischen links- und rechtshändigen Aminosäuren unterscheiden. Mit meinem Carnegie-Kollegen Timothy Filley – heute an der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana) – sowie Glenn Goodfriend von der George Washington ▶

University in Washington überprüfte ich diese Hypothese in mehr als hundert Versuchen.

Unsere Experimente waren im Prinzip einfach, erforderten aber penible Reinraum-Verfahren, um Verunreinigungen durch die in der Umgebung allgegenwärtigen Aminosäuren zu vermeiden. Wir tauchten einen wohlgeformten, faustgroßen Calcit-Kristall in eine 50-prozentige Lösung von Asparaginsäure, einer häufigen Aminosäure. Nach 24 Stunden nahmen wir den Kristall aus der Lösung, wuschen ihn in Wasser und sammelten sorgsam alle Moleküle, die sich an spezielle Kristallflächen geheftet hatten. In einem Experiment nach dem anderen beobachteten wir, dass die „linkshändigen" Flächen des Calcits L-Aminosäuren selektierten und umgekehrt; die jeweiligen Überschüsse erreichten in manchen Fällen 40 Prozent.

Seltsamerweise zeigten Calcitflächen mit fein gestuften Treppenstrukturen die höchste Selektivität. Dieses Resultat lässt uns vermuten, dass die Stufenkanten die L- und D-Aminosäuren zwingen, auf den jeweiligen Flächen geordnete Reihen zu bilden. Unter passenden Umweltbedingungen könnten sich diese Reihen von Aminosäuren chemisch zu proteinähnlichen Molekülen verbinden, wobei die einen zur Gänze aus L-Aminosäuren bestehen, die anderen nur aus dem D-Typ. Falls es tatsächlich zur Proteinbildung kommen kann, wird dieses Resultat sogar noch interessanter; denn jüngste Experimente anderer Forscher deuten darauf hin, dass manche Proteine sich selbst zu replizieren vermögen. In der Frühgeschichte unseres Planeten bildete sich also vielleicht ein selbst-replizierendes Protein auf der Fläche eines Calcit-Kristalls.

Da links- und rechtshändige Kristallflächen in ungefähr gleicher Anzahl auftreten, ereignete sich die chirale Selektion der L-Aminosäuren wahrscheinlich nicht überall gleichzeitig. Vielmehr entstand die erste Gruppe von Molekülen mit erfolgreicher Selbstreplikation – Vorläufer aller irdischen Lebensformen bis zum heutigen Tage – zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort. Es war purer Zufall, dass das erfolgreiche Molekül sich auf einer Kristallfläche entwickelte, die linkshändige Aminosäuren gegenüber rechtshändigen bevorzugte.

Minerale konnten somit als Behälter, Gerüste und Schablonen die Selektion und Organisation des molekularen Zoos auf der Urerde unterstützen. Doch vermutlich spielten sie eine viel aktivere Rolle: Sie wirkten als Katalysatoren für entscheidende Syntheseschritte, die das

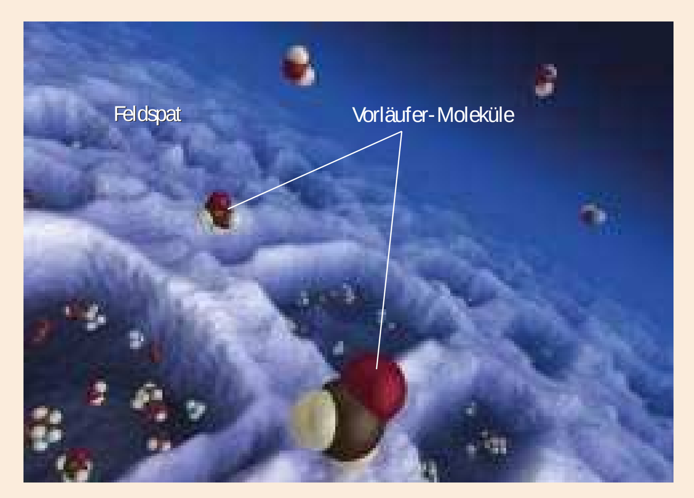
Leblose Lebenshelfer

Die Kraft der Kristalle

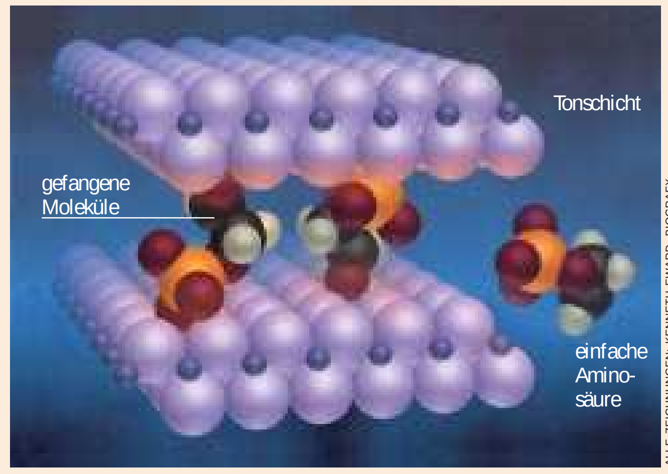
Nichts ist lebloser als ein Stein, sollte man meinen. Wie könnten Felsbrocken – oder die darin enthaltenen Minerale – bei der Entstehung des Lebens mitgewirkt haben? Die Antwort liefert die Chemie. Durch chemische Reaktionen werden aus einfachen Molekülen geordnete mineralische Strukturen. In ähnlicher Weise verdanken alle lebenden Organismen – von Bakterien bis zu Bonobos – ihre Fähigkeit, zu wachsen und zu funktionieren, den Hunderten chemischer Reaktionen, die in den Zellen stattfinden.

Vor vier Milliarden Jahren trug die Erde kein Leben: Nicht Biologie, sondern Chemie veränderte die Oberfläche unseres Planeten. In jener Urzeit waren Minerale – neben den Meeren und der Lufthülle – die einzigen Rohstoffe, aus denen Vorläufersubstanzen biologischer Moleküle entstehen konnten. Somit müssen chemische Reaktionen die ersten Schritte auf dem Weg zum Leben gewesen sein. Eine Abfolge chemischer Umwandlungen dürfte die einfachsten Bestandteile von Luft, Wasser und Erde zu primitiven Ansammlungen kohlenstoffhaltiger Moleküle umgeformt haben, die sich selbst kopieren konnten.

Jüngste Experimente zeigen, dass die entscheidenden Reaktionen wohl nicht möglich gewesen wären ohne die Mithilfe von Mineralen, die als Behälter, Gerüste, Schablonen, Katalysatoren und Reaktionspartner fungierten.



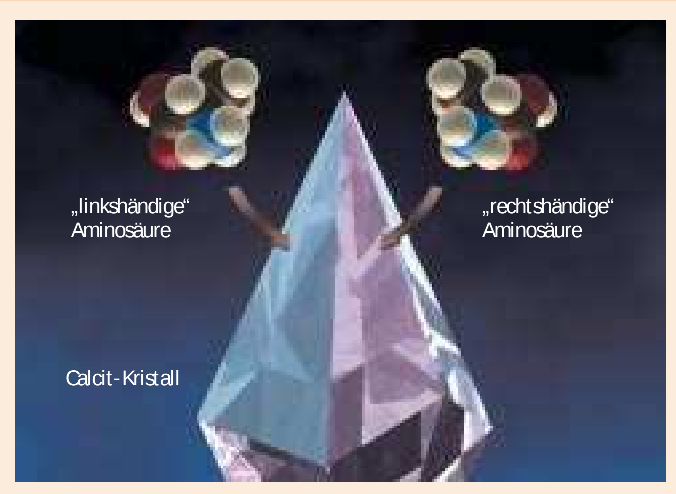
Behälter: **Die verwitterte Oberfläche von Feldspat und anderen häufigen Mineralen enthält unzählige mikroskopische Vertiefungen. Diese winzigen Kammern könnten die Vorläufer-Moleküle des Lebens vor vernichtender Strahlung geschützt haben.**



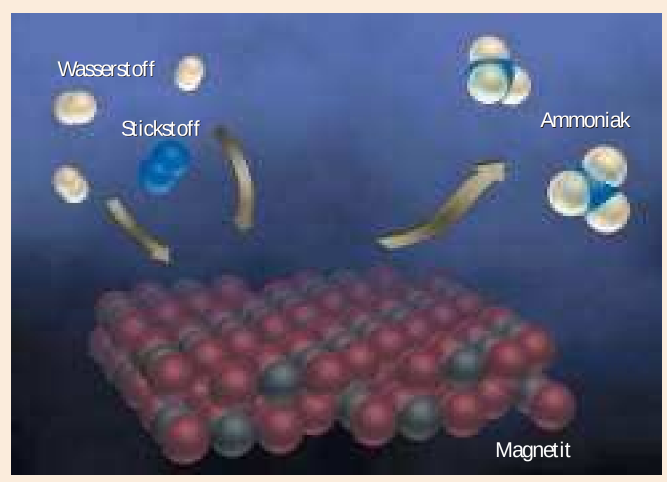
Gerüste: **Geschichtete Minerale, zum Beispiel Tone, können zwischen ihren starren Atomschichten organische Moleküle einfangen. Durch die erzwungene Annäherung reagieren einfache Moleküle miteinander und bilden komplexe Verbindungen.**

anfängliche Inventar an komplexen organischen Molekülen enorm vermehrten.

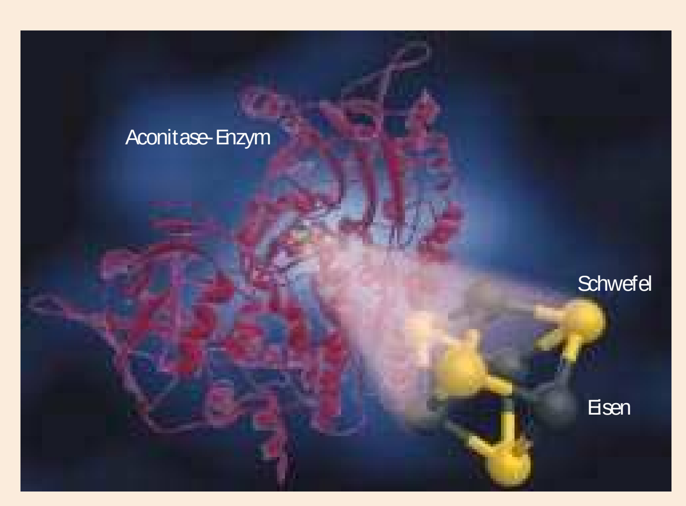
Für diese Hypothese sprechen Experimente, die Brandes 1977 an der Carnegie Institution of Washington leitete. Biologische Reaktionen erfordern Stickstoff in Form von Ammoniak (NH_3), aber auf der Urerde gab es vermutlich nur gasförmigen Stickstoff (N_2), der heute 78 Prozent der Luft ausmacht, in größeren Mengen. Vielleicht, so Brandes, ahmt die Umwelt der hydrothermalen Schlote ein industrielles Synthese-Verfahren für Ammoniak nach, bei dem Stickstoff und Wasserstoff bei hohen Temperaturen und Drücken über eine heiße Metallfläche geleitet werden. Als wir die beiden Gase in Gegenwart von Magnetit – einem mineralischen Eisenoxid – den für Tiefseeschlote charakteristischen Drücken und Temperaturen aussetzten, katalysierte das Mineral tatsächlich die Ammoniak-Synthese (siehe nebenstehenden Kasten).



Schablonen: Das Mineral Calcit lagert links- und rechtshändige Aminosäuren bevorzugt an unterschiedlichen Kristallflächen an. Ein derartiger Sortiervorgang könnte erklären, warum das Leben sich nur der linkshändigen Variante bedient.



Katalyse: Magnetit, ein mineralisches Eisenoxid, vermag die Vereinigung von gasförmigem Stickstoff und Wasserstoff zu Ammoniak auszulösen - einer wichtigen Verbindung, aus der lebende Zellen Stickstoff beziehen.



Reaktionspartner: Eisen und Schwefel bilden das aktive Zentrum bestimmter Enzyme wie Aconitase. Die beiden Elemente können unter sehr hohen Temperaturen und Drücken aus Eisensulfid-Mineralen gelöst werden.

Pyrit als Lebensspender?

Ein besonders nachdrücklicher Verfechter der Idee, Minerale könnten dem Leben auf die Beine geholfen haben, ist Günter Wächtershäuser, ein Chemiker und Patentanwalt in München. Im Jahre 1988 stellte er eine umfassende Theorie der organischen Evolution vor, in der Minerale – vor allem Eisen- und Nickelsulfide, die in Tiefseeschloten reichlich vorkommen – als Schablone, Katalysator und Energiequelle für die Bildung organischer Moleküle dienen. Wächtershäuser meint, die primitivsten Lebensformen seien Molekülschichten gewesen, die auf positiv geladenen Flächen von Pyrit hafteten, einem aus Eisen und Schwefel bestehenden Mineral. Diese Lebewesen hätten zudem Energie aus den chemischen Reaktionen bezogen, die Pyrit erzeugen. Für die Hypothese spricht, dass einige Stoffwechsel-Enzyme, die bei der Energiegewinnung in der Zelle mitwirken, in ihrem Kern einen würfelförmigen Block – Cluster genannt – aus Metall- und Schwefelatomen bergen.

In den vergangenen drei Jahren hat Wächtershäusers eigenwillige Theorie unsere Experimente an der Carnegie Institution beeinflusst. Unser Team, dem der Geochemiker George Cody und der Gesteinskundler Hatten S. Yoder angehören, konzentriert sich auf die Möglichkeit, dass primitive Stoffwechselprozesse in Gegenwart von Mineralen – insbesondere Oxiden und Sulfiden – auch ohne Enzyme ablaufen können. Unsere einfache Strategie folgt dem Beispiel von Millers berühmtem Experiment: Wir set-



zen einst auf der Früherde vorhandene Ingredienzen – Wasser, Kohlendioxid und Minerale – einer kontrollierten Umwelt aus. Dabei versuchen wir die enormen Drücke und Temperaturen nachzuahmen, die für einen hydrothermalen Tiefseeschlot typisch sind. Dazu schließen wir die Ingredienzen, deren Wechselwirkungen wir erforschen wollen, meist in verschweißte Goldkapseln von der Größe einer Vitaminpille ein. Sechs solche Kapseln platzieren wir dann in Yoders „Bombe" – einer Druckkammer aus massivem Stahl, die Drücke bis zu 2000 Atmosphären und Temperaturen von rund 250 Grad erzeugt.

Eines unserer wichtigsten Ziele bei diesen Experimenten zur organischen Synthese – und eine der fundamentalen biochemischen Reaktionen – ist die Kohlenstofffixierung: die Produktion von Molekülen mit einer wachsenden Anzahl von Kohlenstoffatomen. Wie wir festgestellt haben, fördern viele häufige Minerale – unter anderem die meisten Oxide und Sulfide von Eisen, Kupfer und Zink – die Kohlenstoffanlagerung, wie sie bei der so genannten Fischer-Tropsch-Synthese stattfindet.

Chemie der Tiefseeschlote

Mit diesem gängigen industriellen Prozess lassen sich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff kettenförmige organische Moleküle zusammensetzen. Dabei entstehen der Reihe nach zunächst Methan, das ein Kohlenstoffatom enthält, dann Ethan mit zwei Kohlenstoffatomen und so weiter. In der chemischen Industrie dient diese Reaktion zur Synthese von Kohlenwasserstoffen mit praktisch jeder gewünschten Anzahl von Kohlenstoffatomen. Wie unsere ersten Synthese-Experimente von 1996 sowie viel umfangreichere Forschungen durch Thomas McCollom von der Woods Hole Oceanographic Institution beweisen, können durch Fischer-Tropsch-Reaktionen unter Tiefseeschlot-Bedingungen in weniger als einem Tag Moleküle mit dreißig und mehr Kohlenstoffatomen entstehen. Wenn dieser Prozess in den hydrothermalen Regionen der heutigen Erde große organische Moleküle aus einfachen anorganischen Chemikalien erzeugt, dann brachte er das höchstwahrscheinlich auch in der präbiotischen Vergangenheit unseres Planeten zu Wege.

Bei Experimenten mit Nickel- oder Kobaltsulfiden erfolgte die Kohlenstoff-Anlagerung vorwiegend durch Carbonylierung – Einfügen einer Carbonylgruppe, bestehend aus einem Kohlenstoff- und einem Sauerstoffatom. Solche Gruppen binden sich bereitwillig an Nickel- oder Kobaltatome, allerdings nicht besonders stark: Sie können auf andere Moleküle überwechseln und diese so vergrößern. In einer Versuchsserie beobachteten wir die Verlängerung des Moleküls Nonylthiol, das neun Kohlenstoffatome enthält, zu Decansäure mit zehn Kohlenstoffatomen; diese Verbindung gleicht den Säuren, aus denen die fettartigen Bestandteile biologischer Membranen bestehen. Außerdem sind alle Ausgangssubstanzen für dieses Experiment – ein Thiol, Kohlenmonoxid und Wasser – in der Nähe sulfidreicher hydrothermaler Schlote reichlich vorhanden. Durch Wiederholung solch einfacher Reaktionen – Anfügen einer Carbonylgruppe hier oder einer Hydroxylgruppe da – können wir eine Vielfalt komplexer organischer Moleküle synthetisieren.

Die 1500 Experimente zur hydrothermalen organischen Synthese, die wir an der Carnegie Institution durchgeführt haben, ergänzen nicht nur den Katalog interessanter Moleküle, die höchstwahrscheinlich auf der Früherde produziert wurden, sondern offenbaren zugleich ein überraschend komplexes Verhalten von Mineralen, das bedeutsame Folgen für die frühe Biochemie gehabt haben könnte. In den meisten bisherigen Untersuchungen zur Lebensentstehung wurden die Minerale als fest und unwandelbar betrachtet – als stabile Plattformen, auf denen sich organische


Calcit trifft eine Auswahl unter spiegelbildlich aufgebauten Molekülen.


Magnetit wirkt als Katalysator für biochemische Reaktionsfolgen.


Pyrit versorgt biochemische Reaktionen mit Energie.

Moleküle zusammensetzen konnten. Doch wir haben festgestellt, dass Minerale sich in der Gegenwart von heißem Wasser unter hohem Druck aufzulösen beginnen. Die dabei freigesetzten Atome und Moleküle können zu entscheidenden Zutaten der Ursuppe werden.

Dies ergab sich aus unseren kürzlichen Katalyse-Experimenten unter Leitung von Cody. Erwartungsgemäß erzeugten Carbonylierungsreaktionen in unseren Goldkapseln aus einer Mischung einfacher Moleküle Decansäure mit zehn Kohlenstoffatomen. Aber außerdem entstanden größere Mengen von elementarem Schwefel, organischen Sulfiden, Methylthiol und anderen Schwefelverbindungen. Der Schwefel in all diesen Produkten muss aus dem Eisensulfid-Mineral freigesetzt worden sein.

Noch verblüffender war die Freisetzung von Eisen, das die wässrigen Lösungen in den Kapseln deutlich färbte: Es bildete hellrote bis orangefarbene organometallische Komplexe, in denen die Eisenatome von verschiedenen organischen Molekülen umgeben sind. Gegenwärtig untersuchen wir, bis zu welchem Grad diese möglicherweise reaktionsfreudigen Verbindungen als Enzyme wirken können, welche die Synthese komplexer molekularer Strukturen katalysieren.

Die Erkenntnis, dass Minerale auch wichtige Ausgangssubstanzen für Stoffwechselreaktionen oder Enzyme liefern, kommt nicht ganz unerwartet. Dass hydrothermale Flüssigkeiten Minerale auslaugen und deren Bestandteile zu einer hochkonzentrierten Lösung anreichern können, ist schließlich wohlbekannt. So wachsen an den Tiefseeschloten spektakuläre Sulfidsäulen mehrere Meter hoch, indem heißes und mineralhaltiges Wasser aus dem Meeresboden aufsteigt und beim Zusammentreffen mit dem kalten Wasser der Tiefsee neue Mineralschichten auf der wachsenden Säule ablagert. Deshalb nimmt es Wunder, dass gelöste Minerale in den Szenarien zur Lebensentstehung bislang keine wesentliche Rolle gespielt haben.

Alles in allem war der Ursprung des Lebens viel zu kompliziert, als dass wir ihn uns als Einzelereignis vorstellen dürfen. Vielmehr gab es wohl eine Abfolge unspektakulärer Vorgänge, deren jeder ein wenig Ordnung und zusätzliche Komplexität in die Welt der präbiotischen Moleküle brachte. Der erste Schritt muss die Synthese der grundlegenden Bausteine gewesen sein. Nach einem Jahrhundert Forschung steht nun fest, dass die Moleküle des Lebens im Überfluss produziert wurden – zunächst in dem Nebel, aus dem sich unser Sonnensystem bildete, und später an der Meeresoberfläche sowie an hydrothermalen Schloten. Die Urerde bot dem entstehenden Leben eine Fülle von Molekülarten an – viel mehr, als es überhaupt gebrauchen konnte.

Die Minerale brachten Ordnung in dieses Chaos. Indem sie erst einmal Moleküle einfingen und konzentrierten und sie dann selektierten und sinnvoll anordneten, bereiteten sie wahrscheinlich den ersten selbst-replizierenden Molekülsystemen den Weg. Diese verkörperten zwar noch nicht Leben im heutigen Sinne, verfügten aber zumindest bereits über ein entscheidendes Lebensmerkmal. In diesem Szenario begann ein selbst-replizierendes Molekülsystem die Ressourcen seiner Umgebung zu verbrauchen. Unter den geringfügig verschiedenen Varianten, die durch Mutationen entstanden, entbrannte ein Wettbewerb um knappe Ressourcen und trieb den Prozess der molekularen Selektion voran. Die Evolution von selbst-replizierenden Molekülsystemen setzte ein und schuf unweigerlich immer effizientere und komplexere Gebilde.

Unterschätzte Minerale

Letztlich wollen wir mit unserer Arbeit an der Carnegie Institution nur einfache chemische Schritte aufdecken, die zu einem selbst-replizierenden System führen könnten – vielleicht einem, das mit den Stoffwechselkreisläufen in der lebenden Zelle verwandt ist. Sicherlich sind wir noch weit davon entfernt, Leben im Labor zu schaffen, und vielleicht wird es niemals möglich sein, exakt zu beweisen, welche chemischen Umwandlungen einst zur Entstehung irdischen Lebens führten. Doch eines wissen wir: Minerale spielten eine viel wichtigere Rolle, als die meisten Forscher bisher annahmen. Wenn die Wissenschaftler bereit sind, solchen leblosen Stoffen eine Hauptrolle in den Experimenten zur Lebensentstehung zuzubilligen, werden sie der Antwort auf eine der ältesten Fragen der Naturforschung vermutlich ein gutes Stück näher kommen. ■

Robert M. Hazen *erforscht am Geophysikalischen Labor der Carnegie Institution of Washington Minerale unter hohem Druck und simuliert die Umwelt der hydrothermalen Tiefsee-Schlote. Nachdem er 1975 in Geologie an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) promoviert hatte, verbrachte er ein Jahr an der Universität Cambridge, ehe er zur Carnegie Institution ging. 1990 wurde er zudem Geologie-Professor an der George Mason University in Fairfax (Virginia).*

Literaturhinweise

Aus Staub geboren. Leben als kosmische Zwangsläufigkeit. Von Christian de Duve. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1995.

Biogenesis: Theories of Life's Origin. Von Noam Lahav. Oxford University Press, 1999.

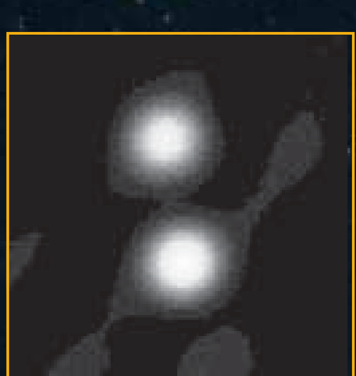
Emergence. From Chaos to Order. Von John H. Holland. Helix Books, 1998.

Origins of Life: The Central Concepts. Von David W. Deamer und Gail R. Fleischaker. Jones and Bartlett, 1994.

Ein schärferer Blick

Eine neue Generation optischer Interferometer vermag weit feinere Einzelheiten auf Himmelskörpern zu entdecken als selbst das Hubble-Weltraumteleskop. Astronomen können damit die Oberflächen ferner Sterne kartieren und selbst einen Astronauten auf dem Mond erkennen.





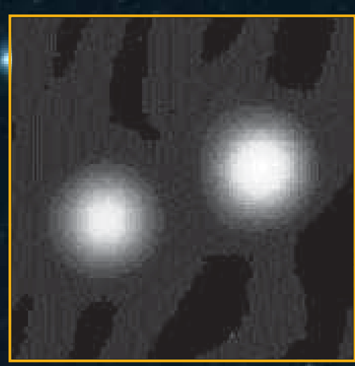
CHRISTIAN A. HUMMEL, USNO / NRL OPTICAL INTERFEROMETER PROJECT

Von Arsen R. Hajian und J. Thomas Armstrong

Vor etwa zwanzig Jahren nahm einer der Autoren dieses Artikels den Feldstecher seines Vaters und stahl sich nachts aus dem Haus. Der Junge wollte sich nach Spielkameraden umsehen – auf anderen Planeten, die seiner Meinung nach um die Sterne am Himmel kreisen müssten. Doch zu seiner Enttäuschung vermochte er keine Einzelheiten zu erkennen: Die flimmernden Lichtpunkte am Firmament, die er mit bloßem Auge sah, blieben auch im Feldstecher punktförmig. Die Sterne sind nämlich so weit entfernt, dass selbst die größten von ihnen nicht mit einem optischen Instrument „aufgelöst“, das heißt als flächiges Objekt erkannt werden können. Einzig die Sonne ist uns nahe genug, um sie als Scheibe zu sehen.

auf die Sterne





Ein bereits mit bloßem Auge erkennbares Doppelsternsystem befindet sich in der „Deichsel“ des Großen Wagens. Der hellere der beiden Sterne, Mizar, ist wiederum doppelt; bereits mit einem Amateurteleskop kann man die beiden Komponenten Mizar A und Mizar B sehen, die 14 Bogensekunden (0,004 Grad) auseinander stehen. Jede dieser beiden Komponenten ist aber selbst wieder ein enger Doppelstern. Mit einem optischen Interferometer gelang es 1996, Mizar A in seine beiden Komponenten – Mizar Aa und Mizar Ab – aufzulösen. Die vier nebenstehenden Abbildungen zeigen diese beiden Sterne während eines halben Umlaufs um ihr gemeinsames Gravitationszentrum.

Zwei Jahrzehnte später kann derselbe Junge – inzwischen vom Hobby- zum Profi-Astronomen herangewachsen – einige der hellsten Sterne tatsächlich als runde Scheiben wahrnehmen. Die extrem hohe Auflösung, die dafür erforderlich ist, ermöglicht eine Technik, die der französische Physiker Armand Hippolyte Louis Fizeau vor mehr als 130 Jahren vorgeschlagen hat: die Interferometrie (vergleiche Kasten auf den Seiten 46/47). Anstatt durch einen Feldstecher oder wenigstens ein herkömmliches Teleskop zu blicken, muss man allerdings auf einen Bildschirm schauen, der an ein optisches Interferometer angeschlossen ist.

Über ein halbes Jahrhundert lang lieferte die Interferometrie mittels Radiowellen brillante Ergebnisse und wurde eingesetzt, um die Strukturen ferner Galaxien und Quasare anhand ihrer Radiostrahlung zu entschlüsseln. Erst in den letzten fünfzehn Jahren jedoch gelangen die technologischen Durchbrüche, die den Einsatz dieses Verfahrens auch bei den viel kürzeren Wellenlängen im infraroten und sichtbaren Bereich des Spektrums ermöglichten. Inzwischen ist die Technik so weit fortgeschritten, dass optische Interferometer selbst das Auflösungsvermögen des Hubble-Weltraumteleskops übertreffen, das von außerhalb der störenden Erdatmosphäre beobachtet: Bei den hellsten Sternen machen diese modernen Instrumente noch Einzelheiten sichtbar, die hundertmal kleiner sind als diejenigen, die das Weltraumteleskop noch zeigen kann.

Die optische Interferometrie ist dabei, sich von einem komplizierten Laborverfahren zu einer Standardbeobachtungstechnik in der Astronomie zu entwickeln. In Kürze gehen Interferometer in Betrieb, die in der Lage sein werden, Sternoberflächen und enge Mehrfachsternsysteme sichtbar zu machen. Auch Staubscheiben um ferne Sterne als Vorläufer von Planetensystemen und sogar die Schatten von Planeten, die vor ihrem Zentralgestirn vorüberziehen, werden zu erkennen sein (siehe „Die Suche nach erdähnlichen Planeten“, Spektrum der Wissenschaft 1/2001, S. 42). Nicht mehr lange, und die Astronomen können auf spektakulären Bildserien die Rotation von Sternen verfolgen und Flecken auf ihren Oberflächen beobachten. Aus dem reichhaltigen Fundus neuartiger Daten werden sich neue Erkenntnisse über Entstehung, Aufbau, Aktivität, Entwicklung und Vergehen der Sterne gewinnen lassen.

Das Besondere an der Interferometrie ist, dass sich durch Kombination zweier nahezu identischer Signale mehr Informationen ergeben als aus einem einzelnen Signal. Überlagert man beispielsweise die Bilder eines Objekts, die mit zwei

getrennten Teleskopen aufgenommen werden, so bildet sich ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen. Der Abstand dieser Streifen und die Veränderungen, die sie während einer Positionsverschiebung der Teleskope aufweisen, geben den Astronomen Hinweise auf die Struktur der Lichtquellen, und das mit viel höherer Auflösung als mit einem einzelnen Teleskop.

Das Auflösungsvermögen eines Fernrohrs wird generell durch zwei Faktoren beschränkt: den Durchmesser der Licht sammelnden Fläche und die Turbulenz der Erdatmosphäre. Um ein Objekt bestimmter Ausdehnung sehen zu können, muss ein Astronom also ein Teleskop geeigneter Größe auswählen und möglichst auch versuchen, die Luftunruhe in den Griff zu bekommen. Aber welchen Winkeldurchmesser – fachsprachlich auch scheinbarer Durchmesser genannt – haben die Sterne am Firmament?

Die Venus beispielsweise erscheint bei ihrer größten Annäherung an die Erde als teilweise beleuchtete Scheibe mit einem Durchmesser von etwa einer Bogenminute, also dem Sechzigstel eines Grades. Ein Mensch mit gutem Sehvermögen könnte diesen Winkel gerade noch mit bloßem Auge auflösen, das heißt er könnte die Venus als Scheibe und nicht nur als Punkt erkennen. Ein Teleskop mit einem Spiegel- oder Objektivdurchmesser von 15 Zentimetern hat eine 60-mal bessere Auflösung als das Auge, weil seine Öffnung, die Apertur, etwa um diesen Faktor größer ist als die Pupille. In einem solchen Teleskop erscheint ein Stern als verwaschenes Scheibchen mit einem Durchmesser von etwa einer Bogensekunde – und das unabhängig von der tatsächlichen

Interferometrie in der Astronomie

Optische Interferometrie ist weit mehr als eine technische Spielerei. Mit ihrem extremen Auflösungsvermögen liefert diese Technik ansonsten unzugängliche Informationen über die physischen Eigenschaften von Sternen.

Durchmesser von Einzelsternen:

Die ersten Messungen von Sterndurchmessern führten Albert A. Michelson und Francis G. Pease 1920 durch. Die beiden Wissenschaftler fanden für den Winkeldurchmesser von Beteigeuze und fünf weiteren Überriesen Werte zwischen 20 und 50 Millibogensekunden. Wenn das menschliche Auge ein solches Auflösungsvermögen besäße, könnten Sie bei ausgestrecktem Arm die einzelnen Atome in Ihrer Hand erkennen.


Die Oberfläche von Beteigeuze

Etwa ein halbes Jahrhundert später bestimmte ein Team um Robert Hanbury Brown am Intensity-Interferometer in Australien die Winkeldurchmesser von 32 Sternen, die zwischen 0,4 und 5,5 Millibogensekunden betragen. Bis heute haben Astronomen die Durchmesser von mehr als hundert Sternen interferometrisch bestimmt, wobei der Messfehler oft nur ein Prozent beträgt. Nur gelegentlich konnten auch andere Verfahren eingesetzt werden, etwa dann, wenn der Mond vor einem Stern vorbeizieht und man die Zeit misst, innerhalb der das winzige Sternscheibchen vom Mondrand verdeckt wird.

Umlaufbahnen von Mehrfachsternen:

Mindestens die Hälfte aller Sterne befindet sich in Doppel- oder Mehrfachsystemen, in denen zwei oder mehr Sterne um ihr gemeinsames Gravitationszentrum kreisen. Die Bestimmung der Umlaufbahnen der einzelnen Komponenten ist die einzige Möglichkeit, die Masse von Sternen direkt zu ermitteln.

1920 untersuchte John A. Anderson am Mount-Wilson-Observatorium in Kalifornien den Doppelstern Capella mit einem sechs Meter langen Michelson-Interferometer. Er bestimmte so den Winkelabstand der beiden Komponenten an sechs Punkten entlang ihrer Umlaufbahn. Bis dahin war Capella als spektroskopischer Doppelstern bekannt – das heißt, dass man nur anhand der Doppler-Verschiebung von Linien in seinem Spektrum auf die Doppelsternnatur geschlossen hatte. Anderson verknüpfte seine Resultate mit den spektroskopischen Daten, um daraus die Neigung der Umlaufbahn gegen die Sichtlinie zu bestimmen und konnte so die Massen der beiden Sterne und die Entfernung des Systems ermitteln.

Moderne Interferometer erreichen ein weit höheres Auflösungsvermögen als die Geräte von damals. Der kleinste jemals gemessene Abstand zwischen zwei Komponenten eines Doppelsternsystems beträgt zwei Millibogensekunden; Christopher D. Koresko und seine Kollegen erhielten diesen Wert für den Stern TZ Trianguli (im Sternbild Dreieck) mit Hilfe des Palomar-Testbed-Interferometers. Heute messen optische Interferometer so präzise, dass meistens die spektroskopischen Daten die Genauigkeit beschränken, mit der Sternmassen bestimmt werden können.

Oberflächenstrukturen von Sternen:

Noch schwieriger als die Messung des Durchmessers von Sternen ist das Beobachten von Einzelheiten auf ihrer Oberfläche. Man braucht dazu nicht nur eine noch bessere Auflösung, sondern auch eine weit höhere Empfindlichkeit, um die sehr kleinen Helligkeitsdifferenzen erkennen zu können. Ein Beispiel ist die so genannte Randverdunkelung: Der Rand einer Sternscheibe erscheint weniger hell als ihre Mitte. Blickt man nämlich zentral auf einen Stern, so schaut man auch tiefer in seine Atmosphäre hinein und betrachtet somit heißere und hellere Schichten. Licht vom Sternrand hingegen stammt aus höher gelegenen und kühleren Schichten, die auch weniger Licht aussenden.


Die Sonne mit mehreren Fleckengruppen

Eine solche Randverdunkelung ist bei unserer Sonne zu beobachten, und sie sollte auch bei allen anderen Sternen nachweisbar sein, was allerdings von deren Spektraltyp abhängt. Moderne optische Interferometer können zwischen einer einheitlich leuchtenden Scheibe und einer mit Randverdunkelung unterscheiden. Solche Beobachtungen helfen, die Theorien über den Aufbau von Sternatmosphären zu überprüfen.

Größe des Sterns am Firmament. Denn die Unschärfe ist instrumentell bedingt, weil das Licht auf seinem Weg durch das Teleskop gebeugt wird. Je kleiner dessen Öffnung, desto größer ist das entstehende Beugungsbild.

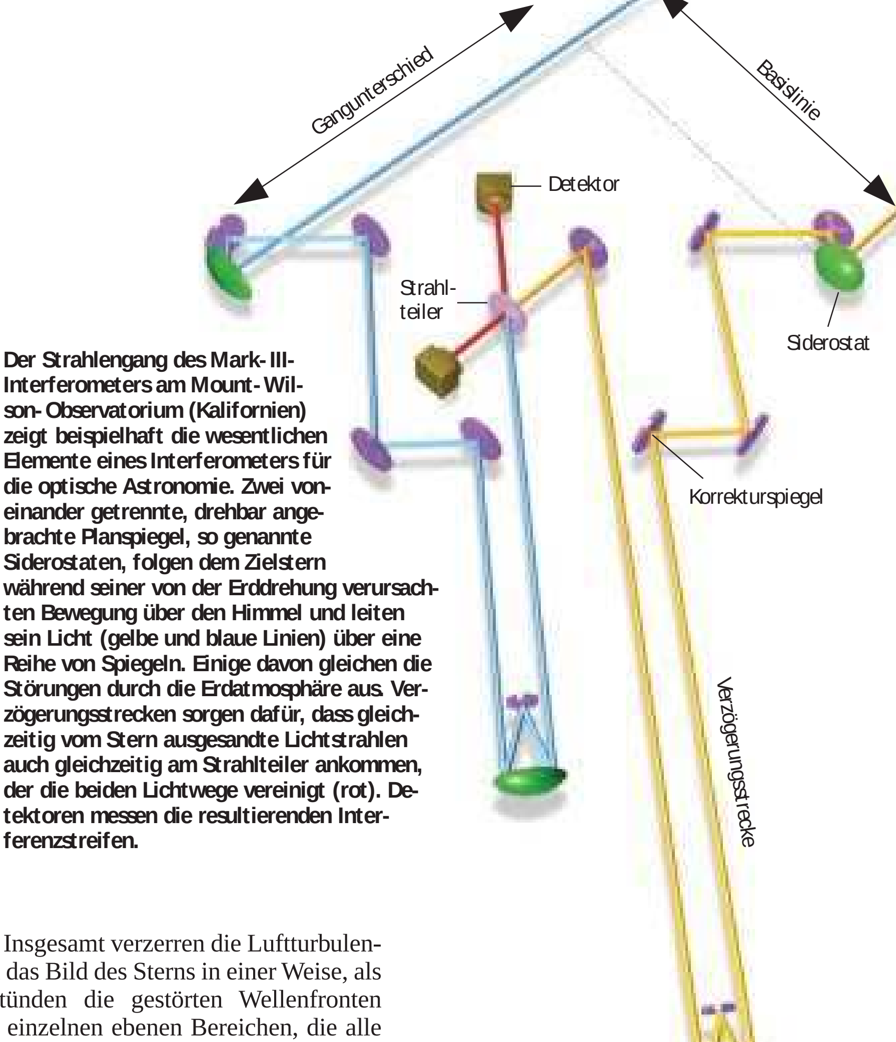
Eine Bogensekunde ist der Winkel, unter dem eine 1-Mark-Münze aus einer Entfernung von 4700 Metern erschiene. Unter dem gleichen Winkel können wir die vier hellsten Monde des Jupiters von der Erde aus sehen. Der Stern mit dem größten Winkeldurchmesser am Himmel (abgesehen von unserer Sonne natürlich) ist Beteigeuze im Sternbild Orion; mit etwa 0,06 Bogensekunden (60 Millibogensekunden) liegt er deutlich unterhalb des Auflösungsvermögens eines 15-Zentimeter-Teleskops. (Unter diesem Winkel würden wir das Markstück sehen, wenn es sich 80 Kilometer entfernt befände.) Die große Mehrheit der am Himmel sichtbaren Sterne ist noch weit kleiner.

Trickreich Turbulenzen ausbügeln

Das Auflösungsvermögen eines Teleskops – seine Fähigkeit, zwei benachbarte Objekte voneinander zu unterscheiden – steigt proportional zu seiner Öffnung an. Deshalb liegt es nahe, ein größeres Teleskop zu verwenden, wenn wir die Oberfläche ferner Sterne sehen wollen. Eines mit 2,5 Meter Durchmesser sollte Beteigeuze auflösen können. Mit einem der beiden zehn Meter großen Keck-Teleskope auf Hawaii sollten sogar Details auf der Oberfläche dieses Sternes erkennbar werden. Doch in der Praxis hilft uns der Sprung von einem Amateur- zu einem Großteleskop nicht viel weiter, solange wir nicht die Einflüsse der turbulenten Erdatmosphäre ausschalten.

Das Problem ist vergleichbar mit dem Versuch, die Schrift am Boden eines Schwimmbads zu lesen, während ein starker Wind Wellen auf der Wasseroberfläche aufpeitscht. Die turbulenten Wellen stören den geradlinigen Verlauf der Lichtstrahlen, die vom Boden des Beckens reflektiert werden. Die Beobachtung der Sterne durch die Erdatmosphäre hindurch ist fast genauso schwierig.

Licht pflanzt sich als elektromagnetische Welle fort. Das Licht eines Sterns erreicht die Erde praktisch als ebene Wellenfronten, die man sich ähnlich wie die Abfolge von Blättern in einem Buch vorstellen kann. Die Wellenfronten werden aber nun von den Turbulenzen in der Atmosphäre verformt, bevor sie das Teleskop erreichen. Sie wirken also eher wie Papierbögen, die zuerst zusammengeknüllt und dann wieder unvollkommen geglättet wurden.



Der Strahlengang des Mark-III-Interferometers am Mount-Wilson-Observatorium (Kalifornien) zeigt beispielhaft die wesentlichen Elemente eines Interferometers für die optische Astronomie. Zwei voneinander getrennte, drehbar angebrachte Planspiegel, so genannte Siderostaten, folgen dem Zielstern während seiner von der Erddrehung verursachten Bewegung über den Himmel und leiten sein Licht (gelbe und blaue Linien) über eine Reihe von Spiegeln. Einige davon gleichen die Störungen durch die Erdatmosphäre aus. Verzögerungsstrecken sorgen dafür, dass gleichzeitig vom Stern ausgesandte Lichtstrahlen auch gleichzeitig am Strahlteiler ankommen, der die beiden Lichtwege vereinigt (rot). Detektoren messen die resultierenden Interferenzstreifen.

Insgesamt verzerren die Luftturbulenzen das Bild des Sterns in einer Weise, als bestünden die gestörten Wellenfronten aus einzelnen ebenen Bereichen, die alle ein wenig gegeneinander gekippt sind. Im sichtbaren Licht sind diese Abschnitte je nach Wind- und Wetterbedingungen fünf bis zwanzig Zentimeter groß. Die Wellenfronten, die ein Teleskop mit zehn Meter Durchmesser erreichen, bestehen deshalb aus Tausenden solcher ebener Abschnitte. All jene Bereiche, deren Orientierung identisch ist, erzeugen an einem bestimmten Punkt in der Brennebene ein Bild des Sterns, einen als „Speckle“ bezeichneten Fleck. Wegen der Vielzahl an Untermengen der Wellenfrontabschnitte mit jeweils gleicher Orientierung besteht das Gesamtbild des Sterns aus zahlreichen solcher Speckles, die entsprechend den atmosphärischen Änderungen sehr schnell hin- und herwabern. Sofern die Belichtungszeit nicht deutlich kleiner als eine Sekunde ist, überlagern sich alle Speckles zu einem verschmierten Scheibchen. Dieses ist selbst unter den besten Bedingungen nicht viel kleiner als das Bild in einem 15-Zentimeter-Teleskop.

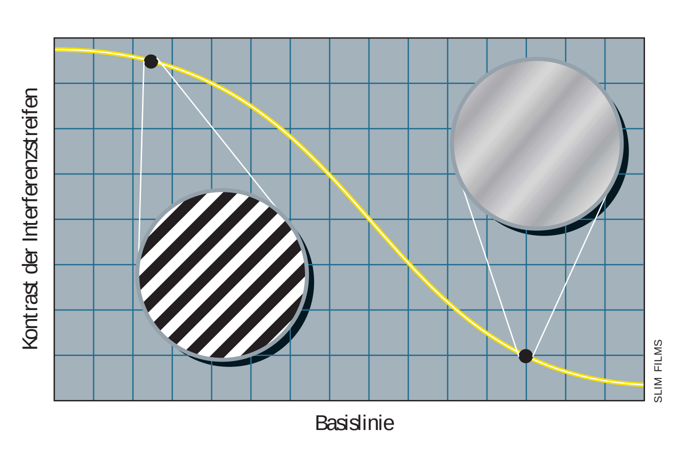
Mit der so genannten Speckle-Interferometrie versuchen die Astronomen, den Einfluss der atmosphärischen Turbulenzen auszuschalten, indem sie ein herkömmliches Teleskop einsetzen und mit Belichtungszeiten von etwa 0,01 Sekunden Momentaufnahmen des Speckle-Bildes erzeugen. Dieses Verfahren hat sich beim Vermessen der Bahnen von Doppelsternen bewährt. Doch damit tatsächlich Bilder zu erzeugen, erwies sich als viel schwieriger als anfangs erwartet.

Eine andere Technik, die adaptive Optik, nutzt Sensoren, um die Verbiegung der ankommenden Wellenfront zu messen. Ein Computer deformiert daraufhin einen Hilfsspiegel im Strahlengang in umgekehrter Weise, sodass diese Verzerrung so weit wie möglich kompensiert wird. Die Form des Spiegels muss dabei in Zeitschritten von wenigen Millisekunden angepasst werden. Das Verfahren hat die Qualität von Großteleskopen in geradezu revolutionärer Weise verbessert, denn es ermöglicht scharfe Abbildungen mit einer Winkelauflösung, die nahe an die durch die Öffnung des Teleskops vorgegebene theoretische Grenze heranreicht (siehe „Adaptive Optik“, Spektrum der Wissenschaft 8/1994, S. 48).

Doch selbst wenn man die Störungen durch die Erdatmosphäre vollständig eliminierte, könnte ein 10-Meter-Teleskop nur wenige Dutzend Sterne als Scheiben ▶

auflösen, nämlich nur diejenigen, die größer als etwa 10 Millibogensekunden erscheinen. Um aber zum Beispiel die Winkeldurchmesser aller mit bloßem Auge sichtbaren Sterne zu bestimmen, benötigten wir ein Teleskop mit 500 Meter Durchmesser. Einen solch riesigen Spiegel, dessen Oberfläche zudem nicht mehr als ein tausendstel Millimeter von der Idealform abweichen dürfte, herzustellen und einem Stern nachzuführen, ist weder technisch noch ökonomisch machbar.

Doch zum Glück ist ein solcher Aufwand gar nicht vonnöten. Anstelle eines 500-Meter-Spiegels genügen zwei kleinere Teleskope in einem Abstand von 500 Metern, um dasselbe Auflösungsvermögen zu erzielen. Man muss nur dafür sorgen, dass die durch die Atmosphäre bedingte Bildunruhe eliminiert und das von beiden Fernrohren empfangene Licht an einer zentralen Stelle interferometrisch vereinigt wird.



Die Interferenzstreifen eines Einzelsterns (links) haben bei kurzen Basislinien einen höheren Kontrast als bei langen Basislinien. Der scheinbare Durchmesser eines Sterns (sein Winkeldurchmesser am Himmel) kann aus den Interferenzstreifen ▸

Betrachten wir einmal drei verschiedene Instrumente:

- ein gewöhnliches Spiegelteleskop,
- ein baugleiches Teleskop, bei dem allerdings bis auf zwei kleine Segmente der komplette Spiegel abgedeckt wurde,
- und ein Interferometer, bestehend aus zwei kleinen Hauptspiegeln sowie einer Vorrichtung, die das von den beiden Spiegeln empfangene Licht zu einem Detektor leitet.

Die Art und Weise, wie das einfallende Licht gesammelt und zum jeweiligen Detektor gebracht wird, unterscheidet sich bei diesen Beobachtungsgeräten.

Im Falle des gewöhnlichen Teleskops sorgt die Krümmung des Hauptspiegels dafür, dass alle von einem Stern eintreffenden Lichtstrahlen zur selben Zeit den Brennpunkt erreichen. (Genau genommen definiert diese Gleichzeitigkeit die Lage des Brennpunkts.) Das Teleskop

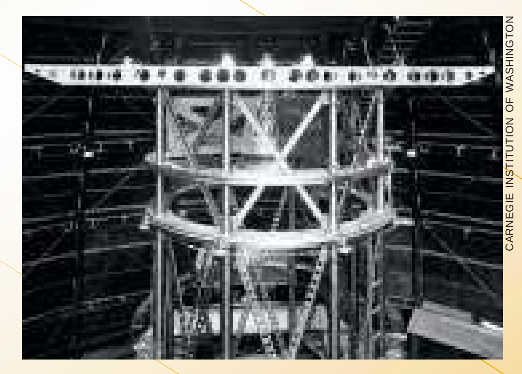
Geschichte der astronomischen Interferometrie

1868: Der französische Physiker Armand Hippolyte Louis Fizeau entwickelt die grundlegende Idee eines optischen Interferometers: Er schlägt vor, eine Maske mit zwei Löchern in den Strahlengang eines Teleskops zu bringen und die überlagerten Bilder des zu vermessenden Sterns zu beobachten. Der Kontrast des entstehenden Interferenzmusters aus hellen und dunklen Streifen nimmt ab, wenn man den Abstand der beiden Löcher vergrößert. Fizeau erkennt, dass der Lochabstand, bei dem das Interferenzmuster verschwindet, ein Maß für den Winkeldurchmesser des Sternes ist.

1876: Édouard Stephan testet das von Fizeau vorgeschlagene Verfahren am 80-Zentimeter-Teleskop in Marseille. Der Abstand von 65 Zentimetern zwischen den Löchern in der Maske reicht jedoch nicht aus, um den Durchmesser von Sternen zu bestimmen: Die überlagerten Bilder weisen stets Interferenzstreifen auf; die Sterne erscheinen also noch als Punktquellen. Stephan kann daraus nur schließen, dass der Winkeldurchmesser der von ihm beobachteten Sterne kleiner als 0,16 Bogensekunden sein muss.

1891: Albert A. Michelson, der offenbar die Arbeiten von Fizeau und Stephan nicht kennt, nutzt dieselbe Methode. Er wendet sie aber auf die Galileischen Monde des Jupiters an – und zwar erfolgreich, denn mit Winkeldurchmessern zwischen einer und zwei Bogensekunden erscheinen diese Himmelskörper weit größer als die fernen Sterne.

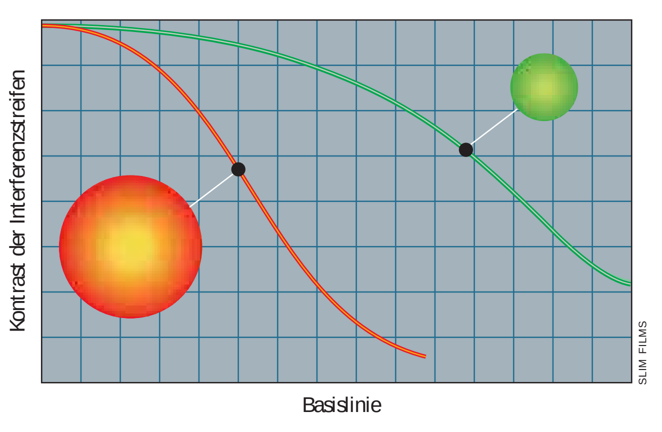
1920: Michelson setzt das damals größte Teleskop der Welt, den 2,5-Meter-Hooker-Reflektor auf dem Mount Wilson in Kalifornien, für die interferometrische Messung von Sterndurchmessern ein. Die Öffnung des Teleskops vergrößert er künstlich, indem er einen sechs Meter langen Metallträger mit Spiegeln an beiden Enden vor den Lichteinlass montiert (Bild). 1930 versucht Michelsons Kollege Francis G. Pease das Gleiche mit einem fünfzehn Meter langen Träger. Er scheitert jedoch, vermutlich weil der Träger keine ausreichende mechanische Steifigkeit besaß.



Das Michelson-Sterninterferometer von 1920

1950–1970: Astronomen perfektionieren den Einsatz von Interferometern im Radiowellenbereich. Weil die Wellenlängen in diesem Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums vieltausendfach größer sind als als Licht, machen sich die störenden Einflüsse der Erdatmosphäre weit weniger bemerkbar, und die Technik zur Erzeugung von Interferenzen ist weniger aufwendig. Vorteilhaft ist zudem die Möglichkeit, die Radiosignale zu verstärken und in jedem Teleskop für die spätere Auswertung aufzuzeichnen.

1958–1976: Robert Hanbury Brown, Richard Q. Twiss und ihre Mitarbeiter setzen zwei wesentliche Meilensteine mit dem Bau des Intensity-Interferometers in der Nähe von Narrabri (Australien). Die künstliche Vergrößerung der Öffnung erreichen sie nicht mit einer Hilfskonstruktion aus mehreren Spiegeln vor einem Teleskop, sondern sie verwenden zwei räumlich getrennte Teleskope mit einem Spiegeldurchmesser von jeweils 6,5 Metern, deren Abstand sich zwischen 10 und 188 Metern variieren lässt. Zudem verwenden sie elektronische Detektoren und Datenaufzeichnungsgeräte, während zuvor mit bloßem Auge beobachtet wurde.
Brown und Twiss nutzen auch das damals neuartige Verfahren, einzelne Photonen an den Teleskopen nachzuweisen und deren Ankunftszeiten miteinander zu korre-



abgeleitet werden (rechts). Wird die Basislinie verlängert, fällt die Sichtbarkeit der Interferenzstreifen für einen großen Stern schneller ab als für einen kleinen. Messungen von kleinen Sternen erfordern deshalb längere Basislinien.

mit teilweise abgedecktem Hauptspiegel arbeitet auf dieselbe Weise: Die zwei Spiegelsegmente reflektieren das Licht, und jedes leitet seinen Teil der Wellenfront zum Brennpunkt. Beide Teleskope bilden die Lichtquelle auf einem im Brennpunkt befindlichen Detektor ab, zum Beispiel auf einem Film oder – wie heute meist üblich – auf einem Halbleiterdetektor, einem so genannten CCD. Allerdings ist die Bildqualität des zweiten Instruments infolge der unvollständigen Ausnutzung seiner Spiegeloberfläche schlechter.

Das dritte Gerät, das Interferometer, nutzt nun nicht zwei Segmente desselben Spiegels, sondern zwei getrennte Teleskope, um das Licht zu sammeln. Demzufolge ist keine gemeinsame große und mechanisch aufwendige Konstruktion erforderlich, die den Spiegel auf den Stern ausrichtet, sondern jedes der Teleskope befindet sich auf einer eigenen relativ kleinen Montierung. Jetzt müssen allerdings besondere Anstrengungen unternommen werden, um das Licht beider Teleskope synchron zusammenzuführen. Im Allgemeinen befindet sich einer der beiden Hauptspiegel etwas näher an dem zu beobachtenden Stern (Grafik auf Seite 45). Folglich trifft die Wellenfront – oder anders ausgedrückt: ein bestimmtes Signal – an diesem Spiegel etwas früher ein als am zweiten Teleskop. Um diese Zeitdifferenz auszugleichen, ist in den Strahlengang, also den Weg, den das Licht von den Hauptspiegeln zum gemeinsamen Detektor zurücklegen muss, ein justierbarer Umweg eingebaut, eine so genannte Verzögerungsstrecke. Diese besteht aus Spiegeln, die auf einer Schiene mit hoher Präzision positionierbar sind.

Eine weitere Besonderheit des Interferometers ist, dass das Licht aus den beiden getrennten Strahlengängen nicht zu einem herkömmlichen Bild, sondern zu ▶



MICHAEL COLLIER UND NATHANIEL WHITE, NPOI

Das Navy Prototype Optical Interferometer in Arizona

lieren. Diese einfache Technik ist von Vorteil, da die Lichtstrahlen der beiden Teleskope selbst nie miteinander in Verbindung gebracht werden müssen, allerdings ist sie weniger empfindlich. Selbst mit einer Belichtungszeit von 100 Stunden können die Astronomen nur Sterne beobachten, die heller sind als die mit bloßem Auge recht hell erscheinenden Gürtelsterne des Orion (im astronomischen Sprachgebrauch haben sie eine Helligkeit von 2,5 Größenklassen).

1974: Zwei weitere Arbeitsgruppen setzen getrennte Teleskope ein, nutzen aber empfindlichere Detektoren. Antoine Labeyrie und seine Mitarbeiter beobachten den Stern Wega bei optischen Wellenlängen und mit einer Basislänge von zwölf Metern. Sie nutzen Michelsons Verfahren, bei dem die beiden Lichtstrahlen vor dem Detektor interferometrisch überlagert werden. Auf dem Kitt Peak in Arizona verwendet eine Gruppe um Charles H. Townes im mittleren Infrarot-Bereich eine aus der Radioastronomie entliehene Technik, um den Planeten Merkur mit einer Basislinie von 5,5 Metern zu untersuchen. Ihre Methode beruht auf der Frequenzwandlung, wobei die registrierten hochfrequenten Signale in niedrigere Frequenzen umgesetzt werden, ähnlich wie die hochfrequenten Radiosignale von einem Radio in die für Menschen hörbaren Frequenzen umgewandelt werden.

1980: Das Very Large Array, ein Radiointerferometer, nimmt in Socorro (Neu-Mexiko) seinen Betrieb auf (siehe „Radiointerferometrie mit sehr großen Basislängen“, Spektrum der Wissenschaft 3/1988, S. 58).

Jüngste optische Arbeiten: Als Resultat der Arbeiten von Labeyrie und Townes wird die optische Interferometrie weiterentwickelt. Townes hat seine Experimente im Bereich des mittleren Infrarot aus den frühen siebziger Jahren fortgesetzt. Seine Gruppe betreibt nun ein Heterodyne-Interferometer aus zwei 1,6-Meter-Teleskopen mit einer Basislinie von maximal 32 Metern. Ein drittes Teleskop wird gebaut; zudem soll die Basislinie auf 75 Meter erweitert werden.

Seit 1974 wurden acht Interferometer für den optischen Bereich und das nahe Infrarot in Betrieb genommen. Fünf weitere befinden sich noch im Bau. Sie alle haben verschiedene Rekorde gesetzt:

➤ Die längste Basislinie erreicht das Sydney University Stellar Interferometer (SUSI) in Australien mit 80 Metern;
➤ die größte Öffnung weist das GI2T in Frankreich mit 1,5 Metern auf;
➤ bis zu vier Teleskope können am Cambridge Optical Apertur Synthesis Array (England) gleichzeitig genutzt werden; am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (Chile) werden es nach Fertigstellung der gesamten Anlage sogar vier 8,20-Meter-Teleskope und drei 1,80-Meter-Teleskope sein;
➤ das Navy Prototype Optical Interferometer (USA) deckt den größten Wellenlängenbereich ab (450 bis 850 Nanometer).

einem Interferenzmuster vereinigt wird. Treffen jeweils die Wellenberge und Wellentäler der beiden Lichtstrahlen gleichzeitig ein, dann sind die beiden Wellen in Phase und sie interferieren konstruktiv, das heißt sie verstärken sich. Treffen im anderen Extremfall jeweils ein Wellenberg des einen Strahls und ein Wellental des anderen Strahls zusammen, so befinden sich die Lichtwellen in Gegenphase, und sie interferieren destruktiv, löschen sich also aus. In der Gesamtheit entsteht in der Bildebene ein Muster, in dem sich helle und dunkle Streifen abwechseln.

Die Astronomen messen nun den Kontrast beziehungsweise die Sichtbarkeit dieser Interferenzstreifen. Der Kontrast wird zum einen von Eigenschaften der Lichtquelle bestimmt (beispielsweise von der Größe eines Sterns oder vom Abstand der beiden Komponenten in einem Doppelsternsystem), zum anderen von der Länge und Orientierung der Verbindungslinie zwischen den beiden zusammengeschalteten Teleskopen. Weil sich die Erde dreht, verändert sich die Lage dieser Basislinie zum beobachteten Objekt kontinuierlich; die Astronomen können deshalb auf einfache Weise Messungen mit vielen verschiedenen Basislinien vornehmen. Die Vielfalt der Messmöglichkeiten ist noch größer, wenn mehr als zwei Spiegel zusammengeschaltet werden und diese auf Schienen verschiebbar angeordnet sind.

Mit Computern werten die Wissenschaftler die Interferenzmuster aus. Sie verwenden dabei so genannte Fouriertransformationen, um die gemessenen Signale in ein reales Bild des untersuchten Himmelskörpers umzurechnen. Ein ähnliches Bild würde ein Teleskop liefern, dessen Spiegel genauso groß wie die Basislinie, aber durch eine Maske bis auf zwei freie Ausschnitte abgedeckt wäre. Ein solches Bild ist aber trotz der hohen Auflösung unvollständig. Man erhält also nur eine Teilinformation über das Objekt – so als würde man durch die Öffnungen eines Zauns hindurch das dahinterliegende Haus nur teilweise sehen. Aber je mehr Daten von unterschiedlichen Basislinien miteinander kombiniert werden, desto mehr vervollständigt sich die Bildinformation – etwa so, als würde man das Haus jetzt aus einem Fahrzeug heraus beobachten, das mit hoher Geschwindigkeit am Zaun vorbei fährt.

Ein optisches Interferometer ist einerseits erheblich preiswerter und einfacher zu bauen als ein einzelnes Riesenteleskop mit monolithischem Spiegel, erfordert aber andererseits besondere Vorkehrungen, die bereits beim Entwurf bedacht werden müssen. Die Lichtstrahlen jedes Teleskops müssen über Dutzende von Metern zu einer zentralen Einrichtung geleitet werden, um sie zu überlagern. Da sich Licht verschiedener Wellenlänge in Luft mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreitet, muss das Licht durch luftleer gepumpte Röhren geführt werden. Die Kosten für die Infrastruktur eines Interferometers steigen deshalb steil mit der Länge der Basislinie und der Anzahl der zusammengeschalteten Teleskope an.

Neben den Kosten sind es praktische Randbedingungen, die sich auf die sinnvolle Anzahl optischer Elemente in einem Interferometer auswirken. Je mehr Teleskope zusammengeschaltet werden, desto umfassendere Informationen lassen sich über einen Himmelskörper gewinnen, denn man erhält gleichzeitig Interferenzmuster für viele unterschiedliche Basislinien. Deren Anzahl steigt ungefähr quadratisch mit der Anzahl der Teleskope an: Während eine Anordnung aus zwei Fernrohren eine einzige Basislinie hat, sind es bei zehn Teleskopen bereits 45. In letzterem Falle wäre es wünschenswert, den Lichtstrahl jedes Teleskops in neun Teilstrahlen zu zerlegen, um diese mit den Teilstrahlen aller anderen Teleskope zu überlagern. Doch die Empfindlichkeit des Instruments würde dadurch sinken, denn jedes Interferenzmuster müsste mit weniger Photonen erzeugt werden. Noch praktikabel ist eine Anzahl von fünf bis zwanzig Teleskopen in einem Interferometer. Beschränkend wirkt sich auch die mit der Anzahl der Basislinien steigende Komplexität der optischen Elemente zum Lenken der Lichtstrahlen aus; denn jeder Spiegel im Strahlengang absorbiert etwa ein Prozent des Lichts.

Atmosphärische Turbulenzen bereiten einem Interferometer genau dieselben Probleme wie einem Großteleskop. Sie bewirken, dass die scheinbare Position eines Sterns unregelmäßig hin- und herspringt. Mit bloßem Auge beobachtet mag dieses Funkeln der Sterne noch romantisch wirken. Für ein Interferometer bedeutet das, dass die zu überlagernden Lichtstrahlen oftmals nur unvollständig oder gar nicht zur Deckung kommen. Eine adaptive Optik im Strahlengang kann hier zumindest teilweise Abhilfe schaffen.

Literaturhinweise

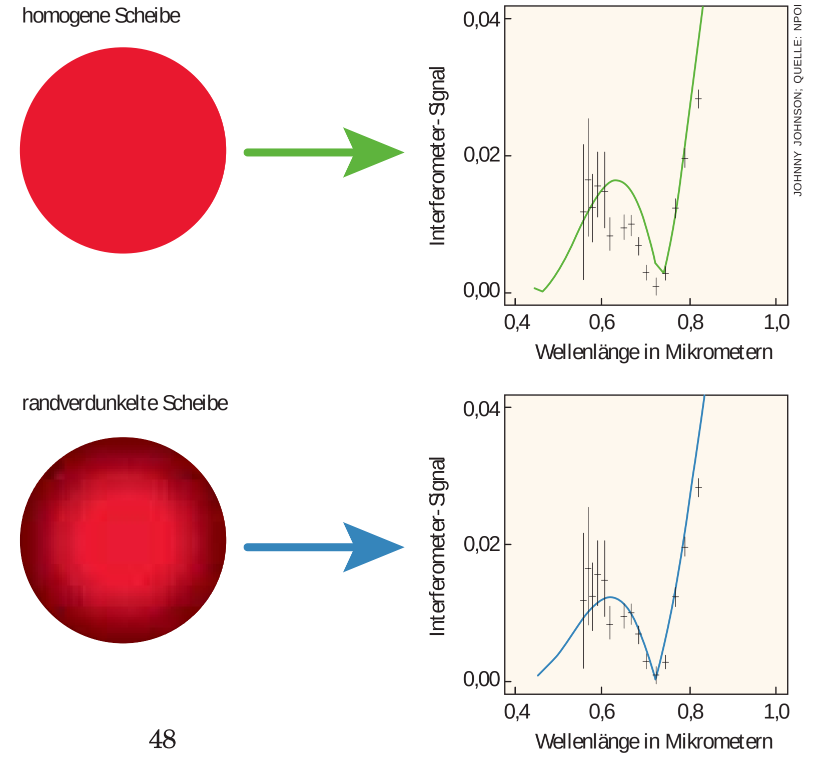
Speckle-Interferometrie und ihre Anwendung auf die Sonnenbeobachtung. Von Claus Rüdiger de Boer. Shaker Verlag, 1994.

Long-Baseline Optical and Infrared Stellar Interferometry. Von M. Shao und M. M. Colavita in: Annual Reviews of Astronomy and Astrophyiscs, Bd. 30, S. 457, 1992.

The Intensity-Interferometer: It's Application to Astronomy. Von R. Hanbury Brown. Halsted Press, 1974.

Interferometrie. Von R. Wohlleben und H. Mattes. Vogel Verlag, 1973.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*



Die Randverdunklung von Sternen lässt sich mit Interferometern hoher Auflösung nachweisen. Die Messdaten von Alpha Cassiopeiae (Kreuze) stimmen schlecht mit den Erwartungen für eine gleichförmig leuchtende Scheibe überein (obere Grafik). Sie passen aber gut zu den Erwartungen einer nur wenig größeren, aber randverdunkelten Scheibe (untere Grafik). Solche Ergebnisse liefern Informationen über Sternatmosphären.

Die Turbulenzen verursachen aber noch ein weiteres Problem: Sie verzögern die Lichtlaufzeit auf zufällige und schnell veränderliche Weise, da jedes Teleskop durch einen unterschiedlichen Ausschnitt der turbulenten Atmosphäre blickt. Dieser Effekt beeinträchtigt die Interferenz, die zur Erzeugung der Streifen im sichtbaren Licht benötigt wird. Um schwächere Sterne beobachten zu können und die Präzision der Interferometer zu erhöhen, muss er deshalb so weit wie möglich beseitigt werden.

Die Notwendigkeit dieser Korrekturen schränkt die Empfindlichkeit des Interferometers erheblich ein. Man kann diese Einschränkung nicht umgehen, indem man das Teleskop vergrößert oder die Beobachtungszeit verlängert. Denn die Informationen, die man für die Korrekturen benötigt – und die im Licht des zu untersuchenden oder dazu eng benachbarten hellen Sterns enthalten sind –, müssen mit Öffnungen von maximal 20 Zentimeter Durchmesser und innerhalb von zehn Millisekunden gewonnen werden (damit der Sensor nur einen Speckle verfolgen muss und sich die Interferenzmuster nicht merklich verändern). Das Interferenzsignal selbst muss ebenfalls innerhalb von wenigen Millisekunden registriert und ausgewertet werden, um eine Verschmierung durch atmosphärische Störungen zu vermeiden.

Der Doppelstern Capella erzeugte im Mark-III-Interferometer ein aussagekräftiges Streifenmuster. Während die Erde rotiert, folgt die Basislinie einer elliptischen Kurve. Für drei verschiedene Wellenlängen (blau, grün, rot) gibt die Größe jedes der eingezeichneten Kreise die Sichtbarkeit der Streifen auf der jeweiligen Basislinie an. Linien gleichen Abstandes gehen durch die Punkte maximaler Sichtbarkeit. Die beiden Komponenten von Capella müssen im rechten Winkel zu diesen Linien stehen (kleine Grafik); der Abstand der Sterne ist umgekehrt proportional zum Abstand der Linien.

Beobachtungstechnik mit Zukunft

Zu den technischen Gerätschaften, die dies leisten, gehören zum Beispiel Hochgeschwindigkeits-Fotozellen, Computer, die jede Nacht mindestens einige Gigabyte an Daten aufzeichnen, und frequenzstabilisierte Laser, die präzise die Länge der über mehrere Millisekunden einstellbaren Verzögerungsstrecke überwachen. Derartige Hilfsmittel wurden erst im Lauf der letzten dreißig Jahre entwickelt und zur Einsatzreife gebracht. Dann haben die Astronomen extrem schnell gelernt, wie sie damit umgehen müssen.

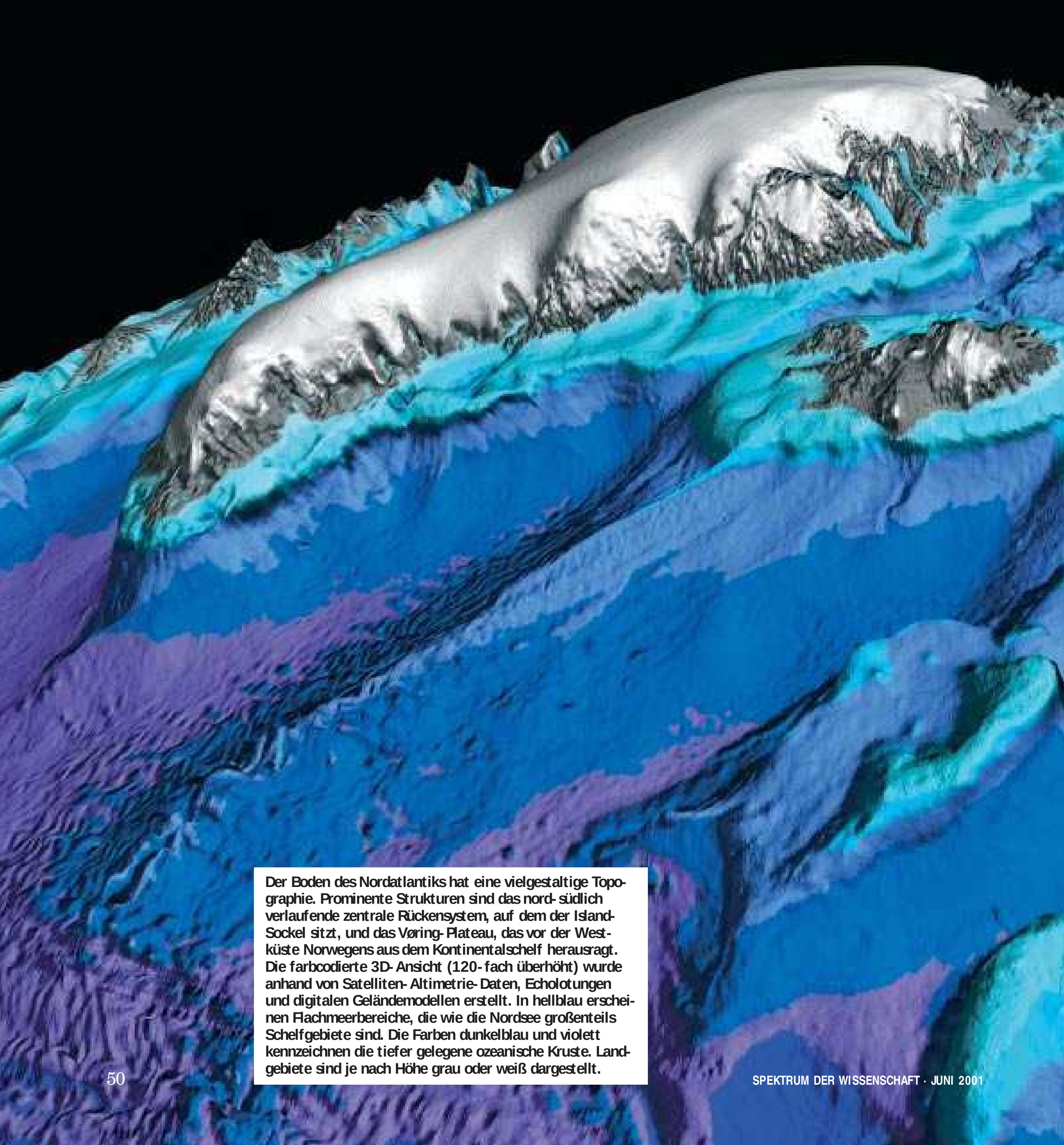
All diese Probleme verursachen den einzigen großen Nachteil der heutigen optischen Interferometer: Sie sind trotz ihrer hohen Auflösung kaum empfindlicher als das menschliche Auge. Obwohl ihr Einsatz somit auf die wenige tausend hellsten Sterne beschränkt ist, liefern Interferometer bereits jetzt große Mengen wertvoller Beobachtungsdaten, deren einzigartige Ergebnisse den benötigten Aufwand rechtfertigen (siehe Kasten auf Seite 44). Und die noch bestehenden Einschränkungen werden sich in naher Zukunft überwinden lassen, wenn ausgefeilte adaptive Optiken zur Verfügung stehen.

In den vergangenen Jahren haben die Astronomen zahlreiche optische und infrarote Interferometer errichtet, deren Leistungsfähigkeit immer mehr anwuchs. Anlagen mit mehreren Teleskopen werden bald in Betrieb gehen – beispielsweise das Navy Prototype Optical Interferometer (NPOI) auf der Anderson Mesa in Arizona mit sechs Teleskopen und fünfzehn Basislinien. Im Prinzip könnten die Astronomen damit Oberflächenkarten von Sternen anfertigen, mit denselben Verfahren, die sie bei Radiointerferometern einsetzen. In der Praxis werden solche traditionellen Methoden in der optischen Interferometrie nur bei Quellen mit der einfachsten Struktur eingesetzt: nämlich bei Doppelsternen. Spezielle Algorithmen für beliebig geformte Quellen – beispielsweise elliptische Sterne, Sterne mit Flecken und Sterne mit Masseabströmungen oder -ausbrüchen – werden bereits entwickelt. Dennoch steht den optischen Interferometern noch ein weiter Weg bevor, bis sie mit Radiointerferometern gleichziehen können.

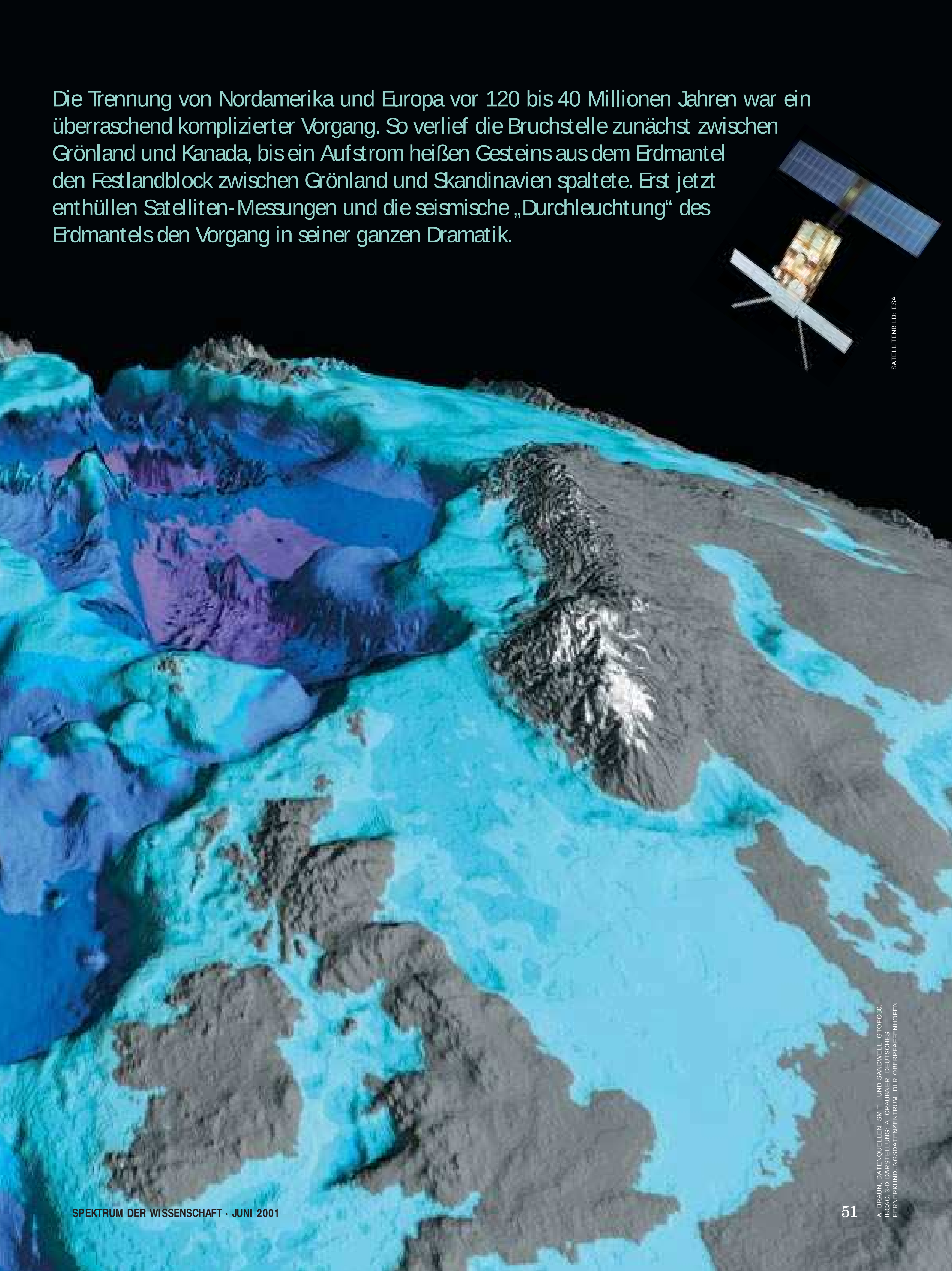
Interferometer mit modernen adaptiven Optiken wie das Keck-Interferometer (zwei Teleskope mit zehn Meter Durchmesser in einem Abstand von 85 Metern) oder das Very Large Telescope Interferometer (eine Gruppe von vier Teleskopen der Europäischen Südsternwarte in Chile mit jeweils 8,2 Metern Durchmesser) werden lichtschwache astronomische Objekte mit hervorragender Auflösung untersuchen. Beide Anlagen werden durch kleinere Hilfsteleskope im Umfeld ergänzt. Vorgeschlagene Satellitenprojekte wie die Space Interferometer Mission, der Terrestrial Planet Finder und die MicroArcsecond X-Ray Imaging Mission werden die Astrometrie (das Forschungsgebiet, das sich mit der exakten Positionsbestimmung von Sternen befasst) in den Mikrobogensekundenbereich vorantreiben und sogar in der Lage sein, Planeten um andere Sterne zu entdecken – oder einen Spaziergänger auf dem Mond. Spielkameraden auf fernen Planeten werden unsere Kinder indes selbst mit solchen Interferometern nicht finden können. Aber dennoch liegt eine Zeit ungeheurer technischer und wissenschaftlicher Resultate vor uns. ■

Seit seiner Jugendzeit, als er den Feldstecher seines Vaters entwendete, interessiert sich **Arsen R. Hajian** *für optische Interferometrie. Er trat 1995 in die Arbeitsgruppe des Navy Prototype Optical Interferometer ein. Zudem baut er am U.S. Naval Observatory, wo er als Astronom angestellt ist, ein interferometrisches Spektrometer auf.* **J. Thomas Armstrong**, *ein Astronom des Naval Research Laboratory in der US-Hauptstadt Washington, ist seit 1989 Mitglied der Arbeitsgruppe des Mark-III-Interferometers.*

Die bewegte Geschichte des Nordatlantiks



Der Boden des Nordatlantiks hat eine vielgestaltige Topographie. Prominente Strukturen sind das nord-südlich verlaufende zentrale Rückensystem, auf dem der Island-Sockel sitzt, und das Vøring-Plateau, das vor der Westküste Norwegens aus dem Kontinentalschelf herausragt. Die farbcodierte 3D-Ansicht (120-fach überhöht) wurde anhand von Satelliten-Altimetrie-Daten, Echolotungen und digitalen Geländemodellen erstellt. In hellblau erscheinen Flachmeerbereiche, die wie die Nordsee großenteils Schelfgebiete sind. Die Farben dunkelblau und violett kennzeichnen die tiefer gelegene ozeanische Kruste. Landgebiete sind je nach Höhe grau oder weiß dargestellt.



Die Trennung von Nordamerika und Europa vor 120 bis 40 Millionen Jahren war ein überraschend komplizierter Vorgang. So verlief die Bruchstelle zunächst zwischen Grönland und Kanada, bis ein Aufstrom heißen Gesteins aus dem Erdmantel den Festlandblock zwischen Grönland und Skandinavien spaltete. Erst jetzt enthüllen Satelliten-Messungen und die seismische „Durchleuchtung“ des Erdmantels den Vorgang in seiner ganzen Dramatik.

SATELLITENBILD: ESA

A. BRAUN, DATENQUELLEN: SMITH UND SANDWELL, GTOPO30, IBCAO, 3-D DARSTELLUNG: A. CRAUBNER, DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM, DLR OBERPFAFFENHOFEN

Von Alexander Braun und Gabriele Marquardt

Dass die Küstenlinien auf beiden Seiten des Atlantiks erstaunlich gut zusammenpassen, fiel schon vor Jahrhunderten manch einem Gelehrten beim Kartenstudium auf – so dem englischen Philosophen Francis Bacon (1561–1626) und dem deutschen Naturforscher Alexander von Humboldt (1769–1859). War die Übereinstimmung reiner Zufall oder steckte mehr dahinter?

„Amerika wurde von Europa und Afrika weggerissen ... durch Erdbeben und Fluten“, meinte 1596 der flämische Kartograf Abraham Ortelius. Der deutsche Theologe Theodor Lilienthal entdeckte 1756 gar in der Bibel die vermeintliche Bestätigung für ein Aufbrechen der Kontinente, durch das sich der Atlantische Ozean bildete. Im 1. Buch Mose, Kapitel 10, Vers 25 steht: „Eber wurden zwei Söhne geboren. Einer hieß Peleg, weil zu seiner Zeit *die Erde zerteilt* wurde...“.

Als der Meteorologe und Geophysiker Alfred Wegener 1912 seine Theorie der Kontinentalverschiebung veröffentlichte, konnte er zwar viele geowissenschaftliche Argumente für eine gemeinsame Vergangenheit der Landmassen zu beiden Seiten des Atlantiks ins Feld führen. Doch eine überzeugende geophysikalische Erklärung, wie die Kontinente gewandert sein sollten, musste er schuldig bleiben. Die zeichnete sich erst in den 1960er Jahren ab, als nach der Entdeckung des Sea-Floor Spreading (der Spreizung des Ozeanbodens) die Theorie der Plattentektonik entwickelt wurde.

Demnach zerfällt die äußerste Schale der Erde, die Lithosphäre, in relativ starre Platten, die sich über einer zähplastischen Schicht, der Asthenosphäre, bewegen. Mit einer mittleren Dicke von etwa hundert Kilometern bestehen sie aus der Erdkruste und einem Teil des oberen Mantels. Sie wachsen an den mittelozeanischen Rücken durch Anlagerung von Magma, das aus der Tiefe aufsteigt, ständig nach und gleiten von dort seitwärts davon. Die neu gebildeten Meeresbodenbereiche werden jeweils parallel zum Erdmagnetfeld magnetisiert. Da sich der Geodynamo aber in Abständen von einigen 100000 bis Millionen Jahren umpolt, entstehen längs der Rückenachse Streifen mit wechselnder Magnetisierungsrichtung. An Subduktionszonen, die oft in der Nähe von Kontinenten liegen und an der Oberfläche als Tiefseegräben ausgeprägt sind, tauchen die ozeanischen Platten in den Erdmantel ab und werden dort aufgeschmolzen.

Die Kontinente sind Teil dieser Platten und bewegen sich weitgehend passiv mit ihnen mit. Allerdings können sie im Unterschied zu ozeanischen Plattenbereichen nicht an Subduktionszonen in den Erdmantel absinken. Wenn zwei Kontinente zusammenstoßen, werden sie miteinander verschweißt; das ist beispielsweise mit Indien und Asien geschehen. Umgekehrt können Festlandmassen aber auch aufreißen und sich teilen. Die Bruchstücke entfernen sich dann allmählich voneinander, wobei zunächst ein Meeresarm zwischen ihnen entsteht, der sich schließlich zum Ozean erweitert. So wurden auch Neue und Alte Welt getrennt (Spektrum der Wissenschaft 8/79, S. 12).

Vom groben Schema zum scharfen Bild

Die ersten Rekonstruktionen der Geschichte des Atlantiks stützten sich hauptsächlich auf Tiefenmessungen mit dem Echolot und auf damals noch vergleichsweise wenige Bohrungen in der Tiefsee. Die bathymetrischen Daten enthüllten – relativ grob, aber ausreichend für das große Bild – die Topographie des Atlantikbodens: den imposanten Mittelatlantischen Rücken, der den Ozean *s*-förmig von Nord nach Süd durchzieht, die zu beiden Seiten hin allmählich abfallenden Becken, die tiefen Einschnitte der Scherzonen, an denen der Rücken immer wieder bis zu mehrere hundert Kilometer seitwärts versetzt ist. Die Bohrkerne gaben Aufschluss über Leitfossilien in den Sedimenten sowie über die Magnetisierung der darunter liegenden basaltischen Kruste und erlaubten damit, das Alter der durchteuften Gesteine zu bestimmen.

Seitdem sind zahlreiche Daten hinzugekommen. Mehr noch: Neue Beobachtungsmethoden erlauben heute nicht nur, ein viel detaillierteres Bild vom Ablauf der Ozeanbildung zu zeichnen, sondern vermitteln auch eine Vorstellung von den geodynamischen Prozessen im Erdmantel, die das Geschehen in der Lithosphäre

CHRONOLOGIE DES NORDATLANTIKS

Vor 500 Millionen Jahren
Europa ist durch einen Ozean namens Japetus von Nordamerika/Grönland getrennt.

Vor 450 Millionen Jahren
Der Japetus beginnt sich zu schließen, während Nordamerika/Grönland und Europa aufeinander zu rücken.

Vor 400 Millionen Jahren
Nordamerika und Europa kollidieren. Dabei entsteht das Kaledonische Gebirge, dessen Reste noch in Norwegen, Schottland, Grönland und den östlichen USA zu sehen sind.

Vor 400 bis 290 Millionen Jahren
Weltweit vereinigen sich alle Landmassen zum Superkontinent Pangäa. Aber noch bevor dieser Vorgang abgeschlossen ist, bilden sich zwischen Skandinavien und Grönland bereits wieder Dehnungsgebiete und Grabenbrüche (Rifts).

Vor 220 Millionen Jahren
Das Riftsystem zwischen Skandinavien und Grönland ist bis zur Rockall-Bank westlich Schottlands vorgedrungen und hat sich zu einem kontinentalen Flachmeer entwickelt.

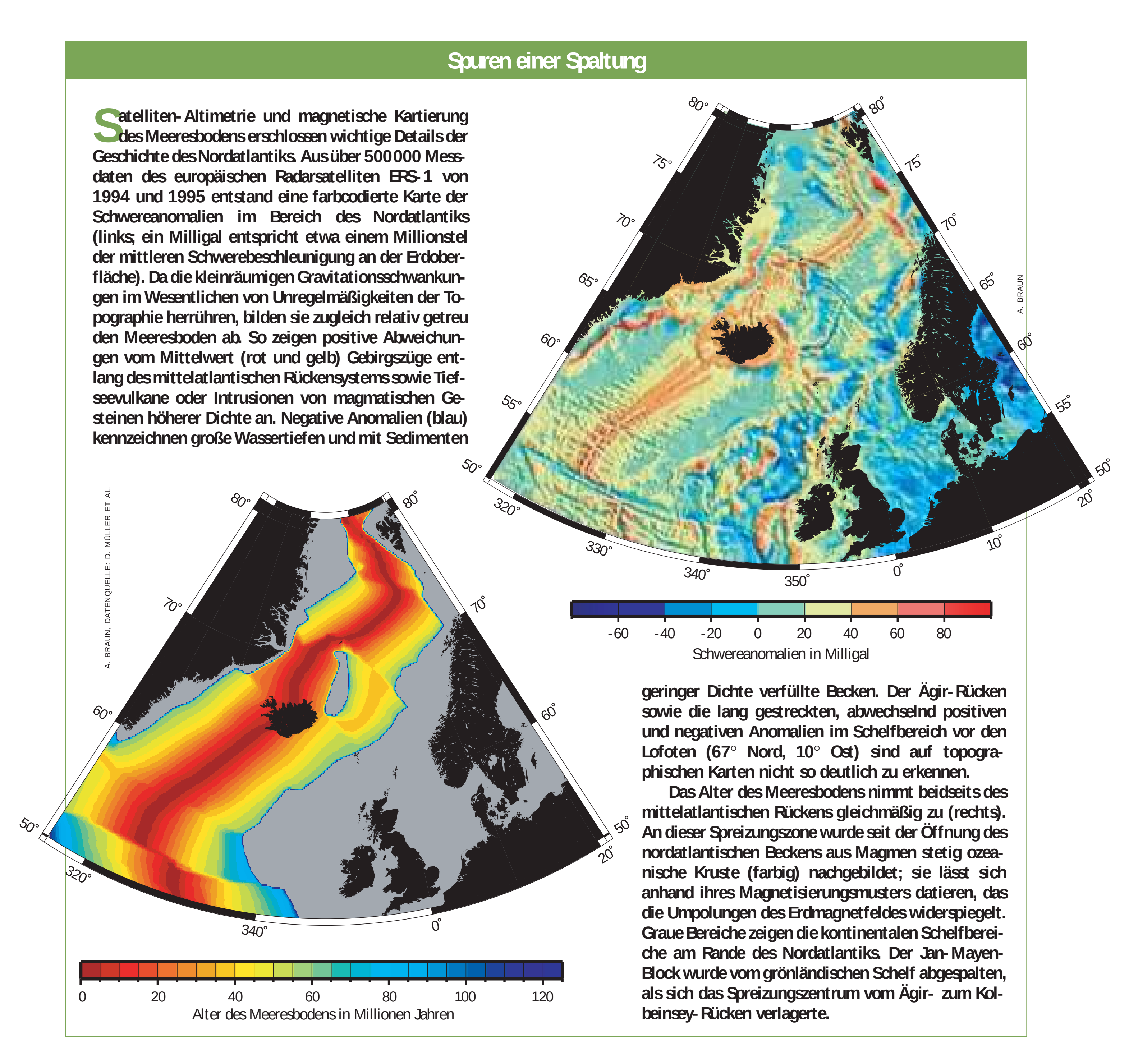
Vor 160 Millionen Jahren
Zwischen den östlichen USA und Westafrika beginnt sich der Atlantik zu öffnen.

Vor 120 Millionen Jahren
Neufundlandbank und Iberische Halbinsel trennen sich.

Vor 80 Millionen Jahren
Der Atlantik stößt bei seiner Ausbreitung nach Norden zunächst zwischen dem Nordosten Kanadas und Grönland vor und öffnet die Labrador-See.

Vor 60 Millionen Jahren
Unter Grönland und dem heutigen Island dringt im Erdmantel eine riesige Masse besonders heißen Gesteins empor. Dadurch stößt der Atlantik mit einem zweiten Ast auch zwischen Grönland und Schottland/Skandinavien nach Norden vor. Dabei bildet sich eine 3000 Kilometer lange Spaltenzone von Südengland bis Nordnorwegen.

Vor 38 Millionen Jahren
Bei Island setzt heftige vulkanische Aktivität ein. Gleichzeitig kommt die Spreizung zwischen Grönland und Kanada zum Erliegen. Die Trennungslinie zwischen Europa und Nordamerika verläuft nun endgültig zwischen Skandinavien und Grönland.



Spuren einer Spaltung

Satelliten-Altimetrie und magnetische Kartierung des Meeresbodens erschlossen wichtige Details der Geschichte des Nordatlantiks. Aus über 500 000 Messdaten des europäischen Radarsatelliten ERS-1 von 1994 und 1995 entstand eine farbcodierte Karte der Schwereanomalien im Bereich des Nordatlantiks (links; ein Milligal entspricht etwa einem Millionstel der mittleren Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche). Da die kleinräumigen Gravitationsschwankungen im Wesentlichen von Unregelmäßigkeiten der Topographie herrühren, bilden sie zugleich relativ getreu den Meeresboden ab. So zeigen positive Abweichungen vom Mittelwert (rot und gelb) Gebirgszüge entlang des mittelatlantischen Rückensystems sowie Tiefseevulkane oder Intrusionen von magmatischen Gesteinen höherer Dichte an. Negative Anomalien (blau) kennzeichnen große Wassertiefen und mit Sedimenten geringer Dichte verfüllte Becken. Der Ägir-Rücken sowie die lang gestreckten, abwechselnd positiven und negativen Anomalien im Schelfbereich vor den Lofoten (67° Nord, 10° Ost) sind auf topographischen Karten nicht so deutlich zu erkennen.

Das Alter des Meeresbodens nimmt beidseits des mittelatlantischen Rückens gleichmäßig zu (rechts). An dieser Spreizungszone wurde seit der Öffnung des nordatlantischen Beckens aus Magmen stetig ozeanische Kruste (farbig) nachgebildet; sie lässt sich anhand ihres Magnetisierungsmusters datieren, das die Umpolungen des Erdmagnetfeldes widerspiegelt. Graue Bereiche zeigen die kontinentalen Schelfbereiche am Rande des Nordatlantiks. Der Jan-Mayen-Block wurde vom grönländischen Schelf abgespalten, als sich das Spreizungszentrum vom Ägir- zum Kolbeinsey-Rücken verlagerte.

und damit auch an der Erdoberfläche steuern. Zu diesen neuen Methoden gehören insbesondere die Satelliten-Altimetrie, also die Höhenmessung von Satelliten aus, sowie die seismische Tomographie, bei der Erdbebenwellen dazu dienen, das Erdinnere zu „durchleuchten“.

Das Bild von der Entstehung und Entwicklung des Atlantiks, das aus den modernen Untersuchungen resultiert, unterscheidet sich deutlich von der weit verbreiteten Vorstellung eines mehr oder weniger schematischen Aufreißens der Lithosphäre, wie es zusammenfassende Darstellungen der Plattentektonik oft nahe legen. Die Vorgänge sind weitaus komplizierter – und damit auch spannender.

In der Arbeitsgruppe „Satellitengeodäsie und Geodynamik“ an der Universität Frankfurt haben wir die neuen Beobachtungsmethoden auf einen Teil des Nordatlantiks angewendet. Um unsere Ergebnisse im Zusammenhang darzustellen, wollen wir sie im Folgenden eingebettet in einen Abriss der gesamten Atlantik-Entstehung nach heutigem Kenntnisstand präsentieren.

Unser Untersuchungsgebiet, das hier vereinfachend „Nordatlantik“ genannt sei, erstreckt sich von der markanten Charlie-Gibbs-Scherzone bei 52 Grad Nord, also etwa auf der Höhe Südirlands, bis hinauf nach 80 Grad Nord. Es erschien uns besonders attraktiv, weil es von fast allen Anrainerstaaten intensiv beobachtet und untersucht wird; deshalb stehen reichlich Daten zur Verfügung. Zudem ist die tektonische Entwicklung hier auf sehr komplexe Weise mit den Prozessen im tiefen Erdinnern verknüpft, sodass wir mit neuen Einsichten in die Natur und die „Arbeitsweise“ unseres Planeten rechnen konnten. Auf beträchtliche Dynamik in der Tiefe weist schon der sehr starke Vulkanismus hin, mit dem die Geschichte des Nordatlantiks verbunden war und immer noch ist.

Die heftigsten Eruptionen gingen der Öffnung des Nordatlantiks vor etwa 56 Millionen Jahren voraus. Dabei bildete sich eine 3000 Kilometer lange Spalten- ▶

zone von Südengland bis Nordnorwegen. Innerhalb von nur zwei Millionen Jahren wurden enorme zwei Millionen Kubikkilometer basaltischer Magmen gefördert. Sie zeigen sich auf seismischen Aufnahmen des Kontinentalrandes in Nordwesteuropa und Ostgrönland als symmetrische Bänder aus kilometerdicken Basaltschichten. Nachdem das Meer diese kontinentale Riftzone überflutet hatte, bildete sich ein weitgehend normaler ozeanischer Spreizungsrücken mit einigen wenigen stärker aktiven vulkanischen Zentren. Sie schufen das äußere Vøring-Plateau vor Norwegen und den westlich der Färöer-Inseln gelegenen Teil der Island-Färöer-Shetland-Bank.

Steuerung aus der Tiefe

Vor etwa 38 Millionen Jahren setzte erneut eine starke vulkanische Aktivität ein, nun besonders heftig bei Island. Die Insel entwickelte sich zusammen mit dem umgebenden Sockel zu einem der größten aktiven Vulkanzentren der Erde. Bis heute wurde dort mehr als eine Million Kubikkilometer an vulkanischem Material ausgestoßen. Diese immense Magmenproduktion signalisiert, dass hier konzentriert heißes Material aus dem tiefen Inneren der Erde aufsteigt. Geophysiker sprechen von einem Plume, weil sich der Aufstrombereich ähnlich wie ein Helmbusch – so die Bedeutung des französisch-englischen Wortes – nach oben hin verbreitert. Durch die Druckentlastung in Tiefen von weniger als 100 Kilometern bilden sich Schmelzen, die den Vulkanismus an der Oberfläche speisen.

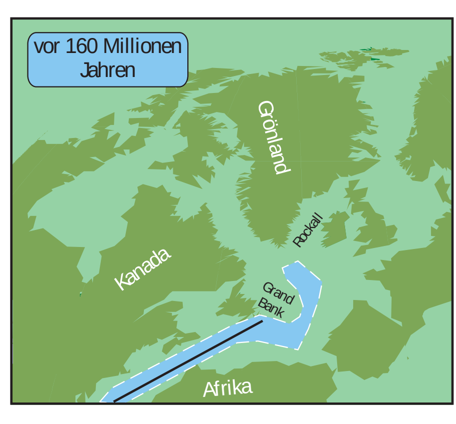
Solch ein Plume dürfte auch der Auslöser für das Aufreißen der noch zusammenhängenden europäisch-nordamerikanischen Landmasse vor 56 Millionen Jahren gewesen sein. Um diese Entwicklung einschließlich der heute wirkenden Prozesse und ihrer Antriebsmechanismen von einem geodynamischen Standpunkt aus genauer zu verstehen, sind zwei Dinge nötig. Einerseits gilt es, die geologischen und tektonischen Strukturen an der Erdoberfläche, die im Laufe der Ozean-Entwicklung entstanden sind, möglichst detailliert zu kartieren. Hier ist die Satelliten-Altimetrie die Methode der Wahl; sie enthüllt uns heute die Oberflächenformen des Meeresbodens mit frappierender Genauigkeit (siehe Kasten auf Seite 57). Andererseits müssen Bewegungsvorgänge im tiefen Inneren der Erde analysiert werden. Dort treten Variationen der Temperatur und damit der Dichte auf, die als Triebfedern von Konvektionsströmungen gelten. Über sie gibt die seismische Tomographie recht detailliert Aufschluss.

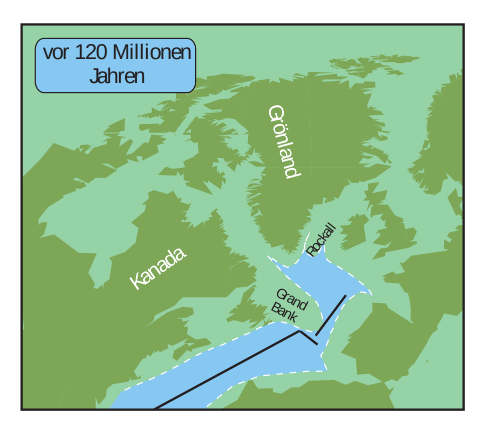
Wie erwähnt, verschwindet ozeanische Kruste an Subduktionszonen wieder im Erdinnern; doch die leichtere kontinentale Kruste bleibt größtenteils an der Oberfläche. Die Kontinente sind daher sehr alt. Sie tragen die Spuren der tektonischen Entwicklung aus vielen hundert Millionen Jahren – teilweise bis zurück zum Beginn der Krustenbildung vor etwa vier Milliarden Jahren. Die kontinentalen Strukturen sind also reich an geologischen Informationen, doch diese lassen sich oft nur sehr schwer deuten, weil sie eine Vielzahl überlagerter Prozesse widerspiegeln.

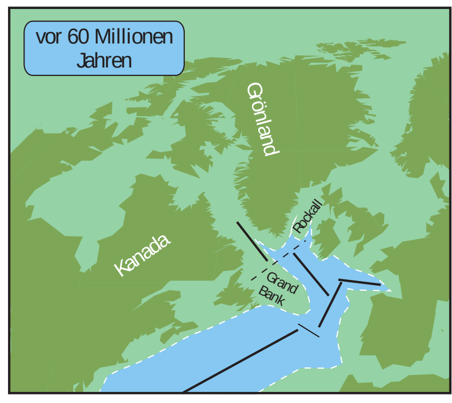
Ganz anders die ozeanische Kruste: Sie ist nur an wenigen Stellen älter als 140 Millionen Jahre, meist sogar erheblich jünger. Ihre Oberfläche ist dementsprechend geprägt durch neuere tektonische Ereignisse, in der Regel durch die gerade ablaufende Ozean-Entwicklung. Doch einfach zu studieren ist auch sie nicht, da sie unter kilometertiefem Wasser verborgen liegt.

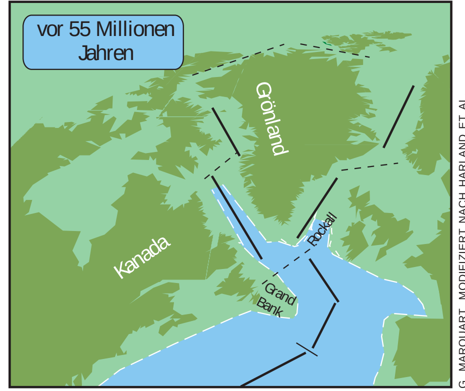
Das schrittweise Vordringen des Atlantiks nach Norden

Die Öffnung des Atlantiks begann vor 160 Millionen Jahren zwischen Westafrika und Nordamerika; die schwarze Linie deutet die Lage des Spreizungsrückens an. In einer zweiten Phase riss das Segment zwischen Spanien und Neufundland auf. Zugleich wurde an der Rockall-Bank in der Nordsee und längs einer breiten Zone zwischen Grönland und Nordeuropa die kontinentale Kruste gedehnt. Vor etwa 80 Millionen Jahren bildeten sich zunächst zwei Rückenäste, ein nordöstlicher in den Golf von Biskaya hinein, wodurch die iberische Halbinsel nach Süden schwenkte, und einer in nordwestlicher Richtung bis zur Rockall-Bank. Während die Aktivität an diesem Ast bald wieder zum Erliegen kam, stieß der nordwestliche Keil zunächst weiter zwischen Grönland und Kanada vor. Vermutlich durch das örtliche Aufsteigen heißen Mantelmaterials unter der europäisch-grönländischen Dehnungszone sprang das Spreizungszentrum vor etwa 56 Millionen Jahren jedoch nach Osten und trennte nunmehr die Europäische Platte östlich von Grönland von der Nordamerikanischen









G. MARQUART, MODIFIZIERT NACH HARLAND ET AL.

Seit den 1920er Jahren haben Tiefenmessungen mit dem Echolot zunehmend Einblicke in die Topographie des Meeresgrundes gegeben. Inzwischen jedoch ist die Satelliten-Altimetrie zu einem unerlässlichen Hilfsmittel geworden, um die Strukturen am Ozeanboden zu kartieren und anschließend zu analysieren.

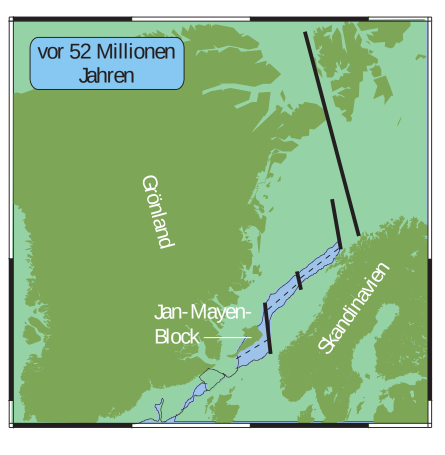
Satelliten und Seismometer erforschen die Erddynamik

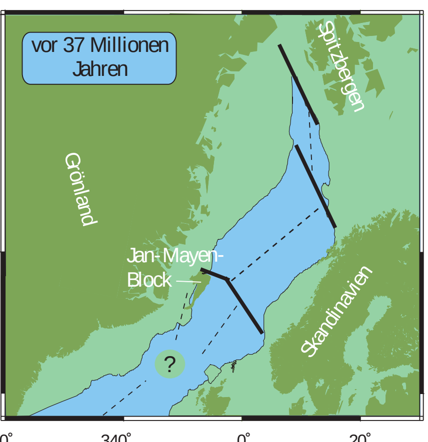
Die künstlichen Erdtrabanten messen, meist mit Impulsen im Radarfrequenzbereich, ihre Höhe über dem Meeresspiegel auf wenige Zentimeter genau. Die Wasserfläche ist, wie Seereisende aus leidvoller Erfahrung wissen, selten glatt. Ihre aktuelle Höhe wird durch Wind und Wellen sowie Meeresströmungen und Gezeiten beeinflusst. Der mittlere Meeresspiegel an einer bestimmten Stelle hängt dagegen von Faktoren im Erdinnern und von der Gestalt des Untergrunds ab. Der Meeresboden zieht nämlich je nach seiner Topographie und Dichte das Wasser darüber unterschiedlich stark an – je mehr Masse vorhanden ist, desto größer ist die Anziehungskraft. Dadurch übertragen sich Strukturen am Grund in sehr verkleinertem Maßstab auf die Wasseroberfläche, pausen sich gewissermaßen durch.

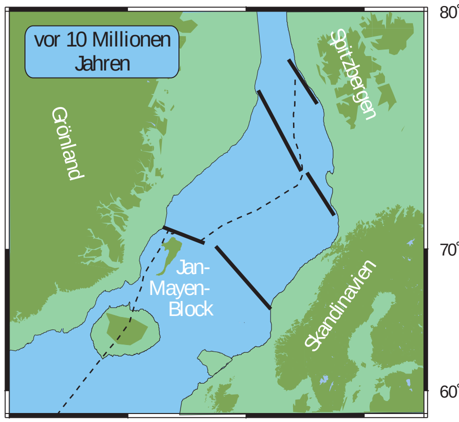
Obwohl das Zurückrechnen von den lokalen Verformungen des mittleren Meeresspiegels auf die Gestalt des Meeresbodens ziemlich kompliziert ist, lohnt sich der Aufwand: Das Verfahren erlaubt einen sensationellen Blick durch die Wassermassen und enthüllt den Grund der Ozeane mit erstaunlicher Klarheit. Dabei profitiert es von der Fülle der Messdaten, die innerhalb kürzester Frist zur Verfügung stehen. So überzieht der Fernerkundungssatellit ERS-2, der 1995 von der europäischen Weltraumorganisation ESA gestartet wurde, wie sein Vorgänger ERS-1 die Erde in einem 35-tägigen Umlaufzyklus mit einem weit gespannten Messnetz. Innerhalb dieses Zeitraums überfliegt er eine Strecke, die an der Erdoberfläche 20 Millionen Kilometer lang ist, und nimmt alle 300 Meter eine Messung vor. Dazu würde ein Schiff mehr als 60 Jahre brauchen, Pannen und Liegezeiten nicht gerechnet. Messungen vom Schiff aus bleiben dennoch von großer Bedeutung, schon um die Satellitendaten zu kalibrieren.

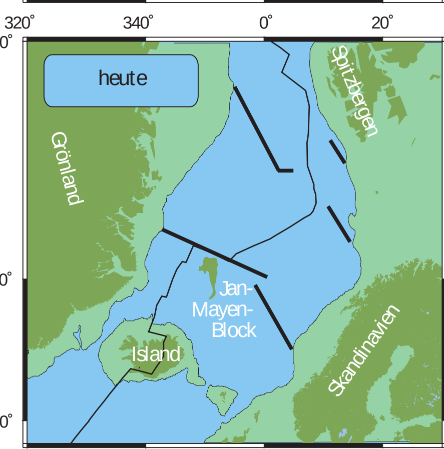
Das andere neue Verfahren, die seismische Tomographie, vermag das Innere der Erde auf ähnliche Weise abzubilden wie die medizinische Computertomographie im menschlichen Körper verborgene Strukturen sichtbar macht. Während in der Medizin Röntgenstrahlen oder Ultraschall zum Durchleuchten dienen, benutzt die Seismologie für denselben Zweck Erdbebenwellen, die sich in allen Richtungen durch den Globus ausbreiten. Dabei gilt es, möglichst viele Erdbeben in verschiedenen Teilen der Erde jeweils durch mehrere seismologische Stationen im Umkreis des Untersuchungsgebietes aufzuzeichnen.

Gemessen werden die Ankunftszeiten der seismischen Wellen bei den einzelnen Stationen. Die Auswertung der Daten per Computer zeigt, dass diese Wellen manche Bereiche im Erdmantel schneller, andere dagegen langsamer durchqueren, als es unter den physikalischen Bedingungen der jeweiligen Tiefe zu erwarten wäre. Geht man nun davon aus, dass der Erdmantel chemisch weitgehend homogen ist, müssen die Variationen von Unterschieden in der Dichte herrühren, die wiederum auf Temperaturunterschieden beruhen. So werden mit der seismischen Tomographie heißere und kühlere Stellen im Mantel kartiert. Da mit steigender Temperatur die ▶









Platte. Die Spreizung zwischen Kanada und Grönland kam zum Erliegen.

Vor 56 bis 52 Millionen Jahren begann sich der Nordatlantik zunächst nur bis zu der ausgedehnten Senja-Grönland-Scherzone, die von der Nordwestküste Norwegens bis in das Arktische Becken hinein reichte, zu öffnen. Alles in allem haben diverse Scherzonen (schwarze Linien) die Lage des Rückensystems (gestrichelte Linien) immer wieder beeinflusst. Vor 37 Millionen Jahren hörte die Bildung ozeanischer Kruste in der Labrador-See westlich von Grönland auf; die Scherzone südlich von Spitzbergen begann sich in einen Teil des Rückensystems umzubilden und förderte so dessen Ausdehnung bis ins arktische Becken. Bei Island setzte vulkanische Aktivität ein. Nördlich der Insel gabelte sich der Rücken in zwei Äste. Vor 37 bis 10 Millionen Jahren spaltete dann der westliche Ast den kontinentalen Jan-Mayen-Block ab, während der östliche, der Ägir-Rücken, abstarb. Island erreichte fast seine heutige Größe und wurde Teil des Rückensystems. Heute findet fast überall im Nordatlantik Meeresbodenspreizung unter Bildung neuer ozeanischer Kruste statt. Die Spreizungsgeschwindigkeit beträgt etwa ein bis zwei Zentimeter pro Jahr.

Dichte des Gesteins ab- und sein Auftrieb zunimmt, sind besonders heiße Regionen Bereiche, in denen das zähfließende Mantelgestein aufsteigt; in kälteren Zonen sinkt es dagegen ab.

Bis vor ein bis zwei Jahrzehnten, als es die neuen Verfahren noch nicht gab, waren die Vorstellungen von der Entwicklung in unserem nordatlantischen Untersuchungsgebiet relativ einfach. Ihnen zufolge begann sich der Mittelatlantische Rücken vor etwa 56 Millionen Jahren von der Charlie-Gibbs-Scherzone nach Norden auszudehnen. Als Ursache galt ein Magmenreservoir unter Island, das die Bildung ozeanischer Kruste förderte. Nachströmendes Magma drückte die neugebildete Kruste auseinander und vergrößerte so den Ozean.

Über die Topographie des Meeresbodens und das Spannungsfeld in seinem Inneren wusste man erst sehr wenig. Deshalb stützten sich die damaligen Vorstellungen hauptsächlich auf die Positionen der markantesten Strukturen: der Platten selbst, des Mittelatlantischen Rückens und der Scherzonen. Dass das Magmenreservoir mehrere Förderkanäle haben und das Spannungsfeld sehr stark variieren konnte, blieb unberücksichtigt. Deshalb gelang es auch nicht, damals schon bekannte tektonische Strukturen in das Modell einzupassen. Die Öffnung des Nordatlantiks wurde rein geometrisch rekonstruiert – dynamische Prozesse blieben ausgeklammert.

Verräterischer Meeresboden

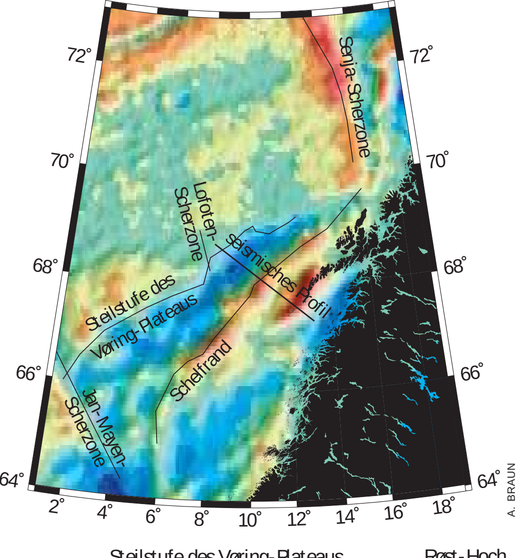
Doch die Altimetriedaten der letzten etwa anderthalb Jahrzehnte haben unser Bild vom Meeresboden revolutioniert. An manchen Stellen ist er heute genauer vermessen als abgelegene kontinentale Regionen. Die Karte für den Nordatlantik, berechnet aus Daten des Satelliten ERS-1, zeigt eine Fülle von Strukturen, in denen sich der Ablauf seiner Entstehung widerspiegelt. Betrachtet man sie zusammen mit einer Darstellung, die das Alter des Ozeanbodens im Nordatlantik zeigt, so erschließen sich schon wichtige Details der tektonischen Geschichte (Kasten auf Seite 53).

Prominenteste Struktur ist das Mittelatlantische Rückensystem, das von der Charlie-Gibbs-Scherzone über den Reykjanes-Rücken nach Norden in den Island-Sockel hinein verläuft. Auf Island selbst gabelt sich diese Spreizungszone auf komplizierte Weise, ehe sich ihr westlicher Ast im Schelf nördlich der Insel über eine kleinere Scherzone wieder mit dem Hauptstrang am Kolbeinsey-Rücken verbindet. Von da ab verläuft der Spreizungsrücken heute sehr nahe am grönländischen Kontinentalrand. Östlich davon finden sich aber noch Relikte eines älteren Exemplars, des Ägir-Rückens, der bis vor etwa 27 Millionen Jahren aktiv war. Danach verlagerte sich das Zentrum der Aktivität, vermutlich in zwei Sprüngen, nach Westen; seit etwa 13 Millionen Jahren befindet es sich nun im Kolbeinsey-Rücken.

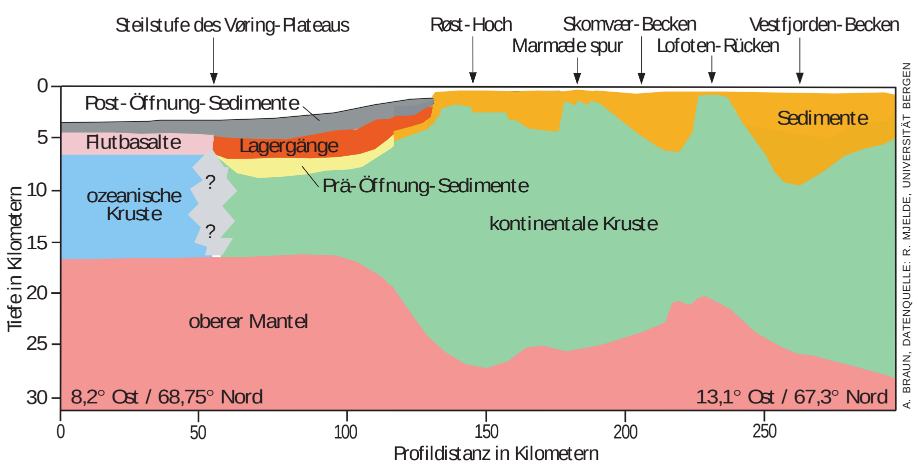
Dieser und der östliche Vorgänger sind im Norden durch die Jan-Mayen-Scherzone begrenzt; zwischen ihnen liegt – deutlich herausgehoben – der schmale Jan-Mayen-Block. Er wird heute als ein kontinentales Fragment gedeutet, das vom grönländischen Kontinentalschelf abgespalten wurde, als sich die Rückenachse an dieser Stelle nach Westen verlagerte. Der heute aktive Strang erstreckt sich zunächst ungestört weiter nach Norden, biegt dann aber scharf nach Nordwesten ab. Hier verlief ursprünglich eine Scherzone am nördlichen Rand von Grönland entlang senkrecht zum Rücken. Sie wurde jedoch vor etwa 37 Millionen Jahren in eine Spreizungsachse umgewandelt. Dadurch entstand der abknickende Teil des Rückensystems mit schräger Anlagerung von ozeanischer Kruste.

Betrachten wir als Ergänzung dazu das tomographische Bild vom Erdmantel unter dem Nordatlantik (die Daten haben uns Wim Spakman und Harmen Bijwaard von der Universität Utrecht zur Verfügung gestellt). Es zeigt deutlich zwei Bereiche mit reduzierter seismischer Geschwindigkeit – ihre Dichte ist also geringer und die Temperatur höher als in der Umgebung, was aufsteigendes Material anzeigt (Kasten auf Seite 59). Der eine ist eine schlauchförmige Struktur, die südlich von Grönland an der Kern-Mantel-Grenze in 2880 Kilometer Tiefe beginnt und durch den unteren Erdmantel nordostwärts aufsteigt. Sie erreicht den oberen Erdmantel in 660 Kilometer Tiefe unter dem europäischen Schelf in der Höhe von Großbritannien. Von dort ab lässt sich die Struktur nicht mehr deutlich verfolgen, jedoch scheint sie sich in mehrere Äste zu verzweigen, von denen einer bei Island in den Mittelatlantischen Rücken mündet.

Der zweite besonders heiße Bereich lässt keine Verbindung zum tieferen Erdmantel erkennen. Er liegt unter Grönland in einer Tiefe von nur 200 bis 400 Kilometern. Dort dünnt die Lithosphäre zum



Dieses geologische Modell (unten) zeigt den Übergang von ozeanischer zu kontinentaler Kruste im Bereich der Lofoten. Die stark deformierte kontinentale Kruste zerfällt an der Oberkante in drei Blöcke, die von tiefen Sedimentbecken getrennt sind. Darin spiegelt sich die Dehnungstektonik im Vorfeld der Öffnung des Nordatlantiks wider. An der Kruste-Mantel-Grenze erkennt man außerdem deutlich zwei wellenförmige Strukturen. Anhand der Dichten dieses Modells, das auf zwei sich überlappenden seismischen Profilen beruht, lassen sich die abwechselnd positiven und negativen Schwereanomalien in der Altimetrie-Karte (links) sehr gut reproduzieren.



Wie sich im Meeresspiegel der Meeresboden abbildet

Die Satelliten-Altimetrie führt nach einem leicht verständlichen Prinzip Höhenmessungen durch. Eine Antenne schickt Impulse im Radarfrequenzbereich senkrecht zur Erde und fängt das reflektierte Signal wieder auf. Eine hochpräzise Uhr bestimmt Abstrahl- und Ankunftszeit. Aus der Differenz – der Laufzeit des Signals – kann dann der Abstand zwischen Antenne und reflektierender Oberfläche berechnet werden. So weit, so einfach.

In der Praxis ist alles jedoch viel komplizierter. Radarwellen durchdringen zwar die Atmosphäre bei Tag und Nacht sowie bei jedem Wetter fast ungestört. Doch ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt von Faktoren wie etwa der Luftfeuchte ab. Deshalb müssen die atmosphärischen Bedingungen während des Messvorgangs entweder mit anderen Geräten bestimmt oder aus Modellen berechnet und bei der Auswertung der Daten berücksichtigt werden.

Außerdem muss zu jedem Messzeitpunkt genau bekannt sein, wo sich der Satellit befindet. Seine Bahn hat jedoch keine ideale Kreis- oder Ellipsenform, sondern weist, bedingt durch das uneinheitliche Schwerefeld der Erde, zahllose Beulen und Dellen auf. Der Globus ist nämlich keine makellose Kugel, sondern ein zwar rundliches, doch unregelmäßig geformtes Gebilde mit noch dazu ungleich verteilten Massen im Innern. Einige Satelliten haben zur Ermittlung ihrer Position aktive Bahnbestimmungssysteme an Bord, die mit Stationen an der Erdoberfläche in Verbindung stehen; andere werden vom Boden aus durch Laserimpulse vermessen.

Für die unregelmäßige Verteilung der Massen am Meeresgrund sorgen hauptsächlich oberflächennahe geologische Prozesse, die das Relief des Ozeanbodens formen, sowie thermische Konvektionsströmungen im Erdmantel, durch die das Gestein dort ähnlich umgewälzt wird wie das Wasser-Öl-Gemisch in einer Lavalampe – nur sehr viel langsamer. Beide Effekte bewirken durch die resultierende Schwerkraft, dass der Meeresspiegel an verschiedenen Stellen in unterschiedlicher Höhe – das heißt in unterschiedlichem Abstand vom Erdzentrum – liegt. Er hat bis 110 Meter tiefe Dellen (südlich von Indien) und bis 90 Meter hohe Beulen (vor Neuguinea).

Nach erfolgreichen Experimenten der ersten amerikanischen Raumstation, dem „Himmelslabor“ Skylab, im Jahre 1973 waren immer wieder Satelliten-Missionen der Höhenmessung gewidmet: Auf GEOS-3 (1975) folgten SEASAT (1978), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), Topex/Poseidon (1992) und ERS-2 (1995). In diesem Jahr ist der Start von Jason-1 und ENVISAT vorgesehen.

Bei den ersten Missionen wurde primär das marine Schwerefeld flächendeckend aufgenommen, um so indirekt ein Bild des Meeresbodens zu erhalten. Über Erhebungen ist nämlich die Gravitation erhöht, sodass sich das Wasser dort auftürmt, während es sich über Senken eindellt. Auf diese Weise „paust“ sich die Topographie des Meeresgrundes quasi auf der Wasseroberfläche durch.

Nachdem mit diesem Verfahren der Ozeanboden inzwischen weitgehend kartiert ist, geht es heute vor allem darum, Änderungen des Meeresspiegels, Strömungssysteme und andere ozeanographische Phänomene zu erforschen, die sich gleichfalls an der Wasseroberfläche abzeichnen. Erst in jüngerer Zeit werden auch Landgebiete und eisbedeckte Flächen näher untersucht.

Je nach Aufgabenstellung empfehlen sich unterschiedliche Satellitenbahnen. Da der künstliche Trabant auf einer polnahen Trajektorie umläuft, während die Erde sich unter ihm dreht, überfliegt er spiralartig nach und nach die ganze Oberfläche außer den höchsten Breiten. Irgendwann erreicht er schließlich wieder seine ursprüngliche Position über der Erdoberfläche; dann hat er einen Zyklus durchlaufen.

Die dafür benötigte Zeitspanne kann je nach Orientierung und Form der Bahn unterschiedlich groß sein. Bei langen Zyklen bilden die benachbarten Messstreifen ein dichtes Netz, bei kurzen liegen sie dagegen weit auseinander. Will man etwa Ozeanströmungen vermessen, die sich schnell verändern können, ist es von Vorteil, wenn der Satellit bald wieder dorthin kommt, wo er schon gemessen hat. Sollen dagegen flächendeckend Schwereanomalien bestimmt werden, muss das Messgerät den Erdboden in einem langen Zyklus mit geringen Bahnabständen überfliegen.

Die amerikanisch-französische Mission Topex/Poseidon, die primär zur Erforschung von Strömungssystemen konzipiert ist, operiert folglich in einem Zyklus von 10 Tagen, der europäische Satellit ERS-2 dagegen in einem 35-Tage-Zyklus. Sein Vorgänger, ERS-1, flog in drei verschiedenen Zyklen, die 3, 35 und 168 Tage dauerten. Der längste diente vor allem der geodätischen Vermessung der Erde, insbesondere zur Bestimmung jener marinen Schwereanomalien, in denen sich die Meeresbodentopographie widerspiegelt. Bei den zwei geflogenen 168-Tage-Zyklen in den Jahren 1994 bis 1995 betrug der Abstand der Messstreifen zwischen 17 Kilometern am Äquator und 8,5 Kilometern bei 60 Grad Breite. Wenn man alle Daten aus der Satelliten-Altimetrie der letzten 15 Jahre verwendet, erhält man Meeresbodenkarten mit einer Auflösung von etwa vier Kilometern.

ERS-1 wurde 1995 nach vier Jahren erfolgreicher Mission betriebsbereit in einer Umlaufbahn „geparkt“. Das Ende kam am 10. März 2000, als das Lagesteuerungssystem ausfiel. Der Nachfolger ERS-2 ist noch in Betrieb und fliegt in etwa 800 Kilometer Höhe um die Erde. Im Oktober soll er von ENVISAT, dem größten jemals gebauten Erderkundungssatelliten, abgelöst werden. ENVISAT wiegt acht Tonnen, ist über zehn Meter lang und wird neben einem neu entwickelten Altimeter neun weitere Fernerkundungssensoren an Bord haben.

A. BRAUN

Aus der Laufzeit eines Radarsignals zwischen einem Satelliten und der Erdoberfläche lässt sich der Abstand zwischen beiden ermitteln, wenn man den Einfluss atmosphärischer Bedingungen wie der Feuchte der Troposphäre oder dem Elektronengehalt der Ionosphäre auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen korrigiert. Zur Umrechnung in topographische Höhenwerte muss zudem die Position des Satelliten relativ zu einem idealisierten Globus, dem so genannten Referenzellipsoid, bekannt sein.

Nordatlantik hin aus, und die anomal heiße Zone folgt dieser Ausdünnung bis zum Mittelatlantischen Rücken, der hier nahe der Schelfkante verläuft.

Die tomographischen Bilder bestätigen, dass heiße Aufstrombereiche im Erdmantel an der Öffnung des Nordatlantiks entscheidend mitgewirkt haben. Anfangs war der Vulkanismus längs des gesamten Rückens durch das Material aus dem tiefen Erdmantel geprägt. Heute speist es – mit abnehmender Tendenz – nur noch den Vulkanismus auf Island und längs des Reykjanes-Rückens südlich davon. Nördlich der Insel werden andere Magmen gefördert, die eventuell mit der heißen Region unter Grönland zusammenhängen.

Vorgeschichte einer Trennung

Wenn wir nun versuchen, die heutigen Kenntnisse über die Geschichte des Nordatlantiks im Zusammenhang darzustellen, so gehört dazu auch eine Vorgeschichte, die erstaunlich weit zurückreicht: bis ins Kambrium vor etwa 500 Millionen Jahren. Damals erstreckte sich zwischen Nordamerika einschließlich Grönland und Europa ein schmaler Ozean, der nach einem Titanen der griechischen Mythologie „Japetus“ benannt wurde. Dieser Vorläufer des heutigen Nordatlantiks begann sich 50 Millionen Jahre später im Zusammenspiel mit einer Subduktionszone, deren Lage nicht geklärt ist, zu schließen. Vor etwa 400 Millionen Jahren war er dann weitgehend verschwunden: Es kam zur Kollision der Kontinente. Dabei entstand ein gewaltiger Faltengebirgsgürtel: das Kaledonische Gebirge. Seine erodierten Rümpfe sind in Norwegen und Schottland, Grönland und den östlichen USA heute noch sichtbar.

In der Folge vereinigten sich fast alle irdischen Landmassen zum Superkontinent Pangäa. Mit seinen riesigen Ausmaßen wirkte er wie eine gewaltige Isolierschicht, die den Wärmetransport aus dem tieferen Erdmantel zur Erdoberfläche hemmte. Unter ihr sammelte sich deshalb zunehmend heißes Material. Es weichte die kontinentale Lithosphäre von unten her auf und dünnte sie dabei aus. Als Folge dieser thermischen Erosion bildeten sich große Dehnungsgebiete und Grabenbrüche, die das Auseinanderreißen der Landmasse einleiteten.

Untersuchungen am norwegischen Kontinentalrand und im Barents-Schelf zeigen, dass diese Extensionsbewegung schon bald nach der Schließung des Japetus einsetzte, als Pangäa noch gar nicht vollständig zusammengewachsen war. Allerdings öffnete sich lange Zeit kein Ozean, sondern lediglich eine breite, vulkanisch nur wenig aktive Grabenbruchzone, die sich langsam nach Süden verlängerte. Vor etwa 220 Millionen Jahren erreichte dieses Riftsystem die Rockall-Bank westlich von Schottland, und es entstanden weiträumige Grabensysteme im Gebiet der Nordsee. Sie waren zwar wasserbedeckt, stellten jedoch – wie noch heute die Nordsee – kontinentale Flachmeere dar und besaßen keine ozeanische Kruste.

Aus den magnetischen Anomalien wie auch aus einigen wenigen Bohrkernen mit den ältesten Sedimenten wissen wir, dass der Atlantik schließlich vor etwa 160 Millionen Jahren zwischen den östlichen USA und Westafrika aufzubrechen begann. Dieser neue Spreizungsrücken war im Nordosten durch eine Scherzone auf der Höhe von Gibraltar begrenzt. Auf der amerikanischen Seite verläuft dort der Südrand der in den Atlantik vorragenden Neufundlandbank – eines alten Extensionsbereiches.

Vor rund 120 Millionen Jahren brach dann auch das Segment zwischen Neufundlandbank und Iberia auf. Damit war eine Rotation der iberischen Halbinsel entgegen dem Uhrzeigersinn verbunden. Der Golf von Biskaya öffnete sich, und der Mittelatlantische Rücken verlängerte sich bis zur Charlie-Gibbs-Scherzone. Vor etwa 80 Millionen Jahren war so die Spaltung zwischen Westeuropa und Nordamerika vollzogen. Bei seinem weiteren Vorstoß nach Norden trennte der Rücken dann zunächst Grönland und den nordamerikanischen Kontinent voneinander: Die Labradorsee entstand. Damit war der Rücken jedoch gleichsam in eine Sackgasse geraten.

Für die Entwicklung in dem nun folgenden Zeitabschnitt haben wir ein Modell entworfen, das auch geodynamische Aspekte berücksichtigt. Ihm zufolge drang vor etwa 60 Millionen Jahren unter Grönland und Europa, die damals noch zusammenhingen, ein Mantel-Plume empor. Der heiße Aufstrom floss, als er von unten gegen die Lithosphäre stieß, zunächst wie Teig auseinander; dabei riss er schon bald die seit 200 Millionen Jahren existierende Extensionszone auf, die der alten „Naht“ des Kaledonischen Gebirges (der „Japetus-Sutur“) folgte, dem Kollisionsbereich nach dem Verschwinden des Japetus-Ozeans.

Aus dem aufsteigenden heißen Material im Erdmantel wurden große Mengen basaltischer Schmelzen abgesondert. Es bildete sich jene schon erwähnte hochaktive 3000 Kilometer lange vulkanische Spaltenzone von Südengland bis Nordnorwegen. Aus der kontinentalen Riftzone entwickelte sich so ein weitgehend normaler Spreizungsrücken.

Die heftig angetriebene Öffnung des Nordatlantiks brachte die ältere Spreizung in der Labradorsee vor rund 36 Millionen Jahren zum Erliegen. Als Folge davon verwandelten sich vermutlich Abschnitte der Senja-Scherzone zwischen Nordgrönland und Spitzbergen in einen Spreizungsrücken. Damit löste sich Grönland von Europa und bewegte sich fortan mit der Nordamerikanischen Platte. Es sieht so aus, als sei die Insel Spielball zweier Kontinente gewesen.

Das Zentrum des heißen Aufstroms im Erdmantel befand sich vermutlich westlich dieser neuen Rückenachse, das heißt unter dem grönländischen Schelf. Das würde erklären, warum der Spreizungsrücken nicht zentral in der kontinentalen Extensionszone der Japetus-Naht aufriss, sondern an deren westlichem Rand: Dort, am Zentrum des Aufstroms aus dem Erdmantel, herrschten die höchsten Zugspannungen. Dies führte schließlich auch dazu, dass sich der Spreizungsrücken westwärts in den grönländischen Kontinentalschelf hinein verlagerte und dabei den Jan-Mayen-Block als kontinentales Fragment vom Schelfrand abtrennte.

Die tieferen Gründe des Auseinanderbrechens

Vor etwa 38 Millionen Jahren setzte die vulkanische Aktivität auch bei Island wieder verstärkt ein. Inwieweit das demselben Plume im Erdmantel zuzurechnen ist, der die Öffnung des Nordatlantiks auslöste, ist noch unklar. Eines spricht jedoch dagegen: Die Laven, die heute auf Island und im südlichen Rückensystem gefördert werden, unterscheiden sich in ihrem Gehalt an gewissen chemischen Spurenelementen deutlich von denen im nördlich angrenzenden Rückensystem. Andererseits ähneln sie Vulkaniten der Nordatlantischen Vulkanischen Zone, beispielsweise im Vøring-Plateau zwischen Island und Norwegen.

Literaturhinweise

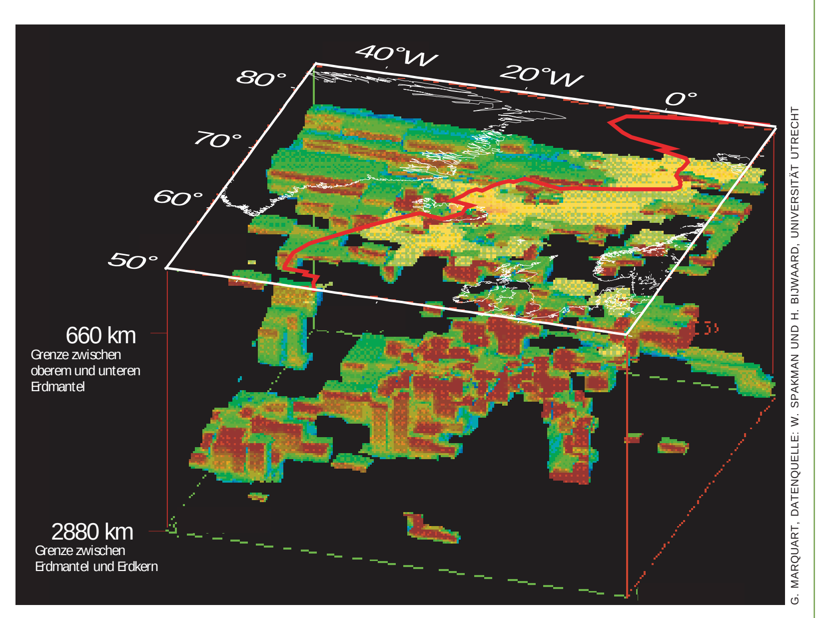
Geodynamische Modellierung der Extensionstektonik im norwegischen Kontinentalrand unter Verwendung von ERS-1 Satelliten Altimetrie Daten. Von A. Braun. Dissertation Universität Frankfurt, Scientific Technical Report STR99/03, GeoForschungs-Zentrum Potsdam (GFZ), 1999.

Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Soundings. Von W. H. F. Smith und D. T. Sandwell in: Science, Bd. 277, S. 1956 (1997).

Geodynamik und Plattentektonik. Von Peter Giese (Hg.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1995.

Der Einfluss von Mantel-Plumes

Seismische „Durchleuchtungen“ des Erdmantels unter dem Nordatlantik enthüllten Bereiche, in denen sich Erdbebenwellen ungewöhnlich langsam ausbreiten. Sie entsprechen Zonen mit besonders heißem Gestein, das aus der Tiefe empordringt. Ein solcher Aufstrom oder fachsprachlich Plume dürfte maßgeblich an der Öffnung des Nordatlantiks mitgewirkt haben. Unter dem mittelatlantischen Rückensystem (rote Linie) erkennt man in Gelb ziemlich dicht an der Oberfläche anomal heiße Bereiche. Eine schlauchförmige Struktur steigt von der Kern-Mantel-Grenze am südwestlichen Rand der Box steil nach Nordosten an und verzweigt sich im oberen Mantel unter Island. Eine zweite sehr viel breitere und flachere Struktur erstreckt sich von Westen unter Grönland bis zum Mittelatlantischen Rückensystem und versorgt dieses vermutlich mit Magma. Dass sich die Laven südlich und nördlich von Island chemisch unterscheiden, spricht für zwei getrennte Förderquellen, die möglicherweise den beiden Strukturen im seismischen Bild entsprechen.



Zweifellos ist Island seit etwa 38 Millionen Jahren das Zentrum eines ortsfesten Massenaufstroms im Erdmantel, eines so genannten Hot Spots. Genau darüber befindet sich der Mittelatlantische Rücken, der hier über die Wasseroberfläche hinaus ragt. Südlich und nördlich der Insel hat er sich in den letzten Jahrmillionen allerdings um etwa 250 Kilometer nach Westen verschoben. Das ozeanische Rückensystem hat das Zentrum des Aufstroms also gleichsam überfahren; nur Island mit dem Vatnajökull-Gebiet als Zentrum des Vulkanismus ist quasi hinter der allgemeinen Bewegung zurückgeblieben. Welche Vorgänge im Untergrund dazu geführt haben, ist noch unklar.

Zu neuen Erkenntnissen über Strukturen, die unter der Erdoberfläche verborgen sind, verhalf uns aber nicht nur die Tomographie, sondern auch die Satelliten-Altimetrie. Auf dem Lofoten-Vesterålen-Schelf vor der nordnorwegischen Küste offenbart sie eine ausgeprägte Extensionstektonik aus der Zeit vor und während der Öffnung des Nordatlantiks. Davon wurde zu unserer Überraschung nicht nur die Erdkruste, sondern auch der oberste Erdmantel erfasst.

Unter dem flachen Wasser des Lofoten-Vesterålen-Schelfs ist der Meeresboden fast eben. Die Altimetrie-Daten dagegen zeigen eine bewegte Topographie mit Höhenzügen und Tälern parallel zur Küste (Bild auf Seite 56). Wie kommt es zu diesem Widerspruch? Offenbar stammen die Schwereanomalien hinter den Altimetrie-Daten in diesem Falle nicht von einer unregelmäßigen Oberfläche der festen Erde, sondern von der Verteilung unterschiedlich dichter Gesteine darunter.

Die Erdölindustrie hat dieses Gebiet gründlich exploriert. Deshalb ist der Aufbau der oberen Erdkruste hier sehr gut bekannt. Parallel zur Küste verlaufen demnach schmale, tiefe Becken, die mit bis zu acht Kilometer mächtigen Ablagerungen verfüllt sind. Diese sind pro Volumeneinheit um fünf bis zwanzig Prozent leichter als das Gestein, in dem sie lagern. Die Becken entstanden im Rahmen der Dehnung, die der Öffnung des Nordatlantiks lange vorausging; das war bereits in der frühen Kreidezeit, vor etwa 140 Millionen Jahren. Durch die Zerrung der Kruste zerbrach diese in einzelne Blöcke, die absackten. Die so entstandenen Rinnen füllten sich mit Sedimenten.

Rolf Mjelde und seine Mitarbeiter an der Universität Bergen haben zwei einander überlappende seismische Profile vom Lofoten-Vesterålen-Schelf erstellt und sie in ein geologisches Modell integriert. Wir entwickelten es weiter und berechneten aus der Dichteverteilung der unterschiedlichen Gesteine die Schwereanomalien. Sie stimmen sehr gut mit den Daten aus den Satellitenbeobachtungen überein.

Die Berechnungen und Vergleiche ergaben jedoch, dass das Schweresignal nicht allein durch die Dichteunterschiede zwischen Krustenblöcken und Sedimenten zu erklären ist. Signifikante Beiträge liefert auch der tiefere Untergrund – nämlich eine wellenartige Struktur an der Grenze zwischen Erdkruste und -mantel. Eine so stark deformierte Kruste ist untypisch für vergleichbare Kontinentalränder. Sie spiegelt das komplexe regionale Spannungsfeld zur Zeit vor und während der Öffnung wider.

Die tektonische Entwicklung des Nordatlantiks hat sich somit als erstaunlich komplex herausgestellt. Eine Vielzahl von schwer zu überblickenden geodynamischen Vorgängen machen ihre Rekonstruktion noch immer zu einer anspruchsvollen Aufgabe. Obwohl das Verständnis der globalen Zusammenhänge in den letzten Jahrzehnten stark gewachsen ist, können Geowissenschaftler bei ihrer Spurensuche in einer längst vergangenen Epoche auch weiterhin mit Überraschungen rechnen.





__Alexander Braun__ hat 1998 an der Universität Frankfurt in Geophysik promoviert. Heute beschäftigt er sich am GeoForschungsZentrum Potsdam mit satellitengeodätischen Verfahren und ist Manager eines interdisziplinären Forschungsprojekts über Meeresspiegeländerungen. __Gabriele Marquart__ hat sich auf Geodynamik und Satellitengeodäsie spezialisiert und an der Universität Uppsala habilitiert. Sie leitet die Forschungsgruppe „Interpretation des Erdschwerefeldes“ im Bereich Geodynamik an der Universität Frankfurt und arbeitet insbesondere über den Island-Plume und die geodynamischen Wechselwirkungen zwischen Erdmantel und Lithosphäre. Die sprachlich-didaktische Gestaltung des Artikeltextes übernahm der Wissenschaftsjournalist __Erwin Lausch__ aus Ahrensburg.

GENETIK

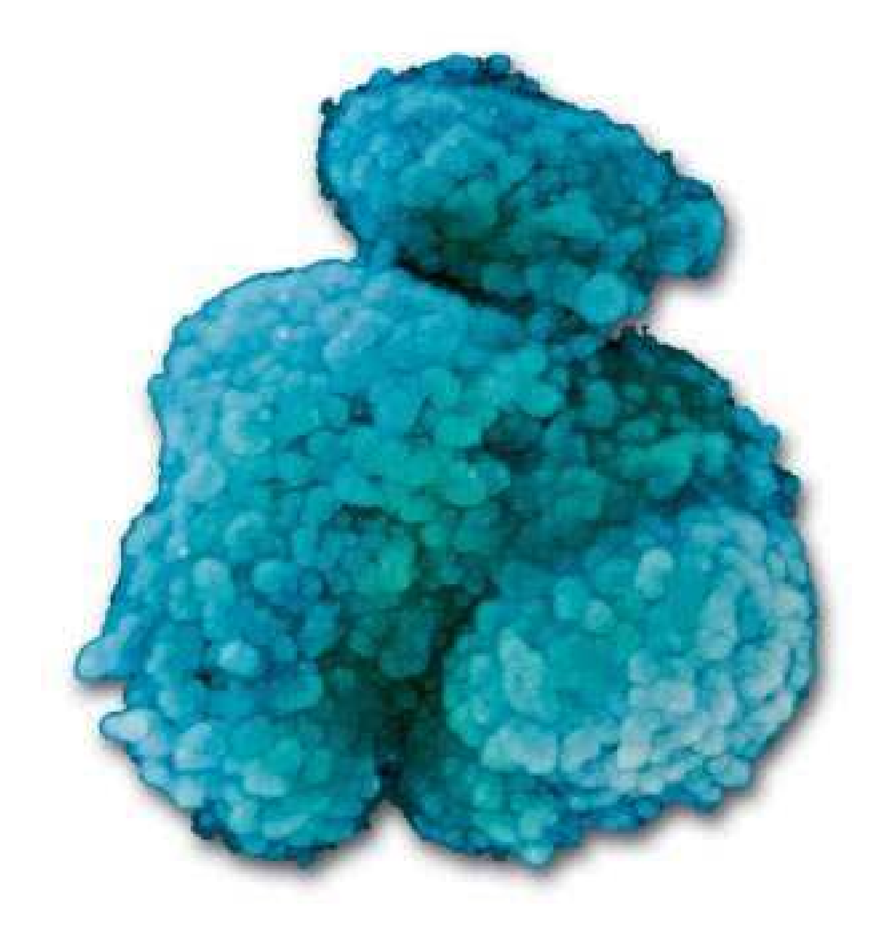
Das kleine Chromosom der Männlichkeit

Einst glichen die beiden Geschlechtschromosomen X und Y einander wie Zwillinge. Dann lenkte eine zufällige Veränderung das Y auf seltsame Wege.

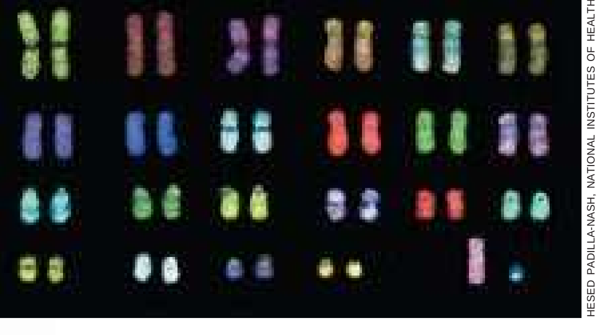
Von Karin Jegalian und Bruce T. Lahn

Die menschlichen Geschlechtschromosomen X und Y sind ein seltsames Gespann. Alle anderen 22 Chromosomenpaare in unseren Zellen sehen wie Zwillinge aus: Beide Partner-Chromosomen – eines vom Vater und das andere von der Mutter – sind für gewöhnlich gleich groß und tragen einander entsprechende Gene. Das Y ist dagegen nicht nur viel kleiner als das X, es beherbergt mit ein paar Dutzend Genen auch deutlich weniger an brauchbarer Information als sein X-Partner – der bringt es auf immerhin 2000 bis 3000 Erbfaktoren. Dennoch existieren für einige Y-Gene keine Pendants auf dem X-Chromosom. Insgesamt enthält das Y ungewöhnlich viel an „nutzloser" Erbsubstanz: Zumindest trägt sie keine verschlüsselte Anweisung, nach der die Zelle brauchbare Moleküle – etwa bestimmte Proteine – herstellen könnte. Die Molekulargenetiker sprechen regelrecht von „Schrott"-DNA.

Bis vor kurzem vermochte niemand so recht zu erklären, wie das Y-Chromosom in diesen wenig schmeichelhaften Zustand geraten ist. Wohl existierten verschiedene Theorien darüber, aber kaum Möglichkeiten, sie zu überprüfen. Das hat sich mittlerweile geändert, und zwar großenteils dank des Human-Genom-Projekts und paralleler Bemühungen, das menschliche Erbgut vollständig zu ent-



Vor Hunderten von Jahrmillionen waren X und Y noch gleichartige Partner-Chromosomen, ähnlich wie ein Ei dem anderen. Während das X (rosa) unversehrt überdauerte, schrumpfte das Y (türkis) jedoch zusammen. Wie das geschah wird nun zunehmend klar. Die Mikroaufnahmen zeigen die beiden Geschlechtschromosomen bereits verdoppelt vor einer normalen Zellteilung.



HESED PADILLA-NASH, NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH

Eine normale männliche Zelle enthält beim Menschen 22 Paare gleichartiger Chromosomen, dazu ein X- und ein Y-Chromosom. Jeweils ein Partner stammt von der Mutter, der andere vom Vater.

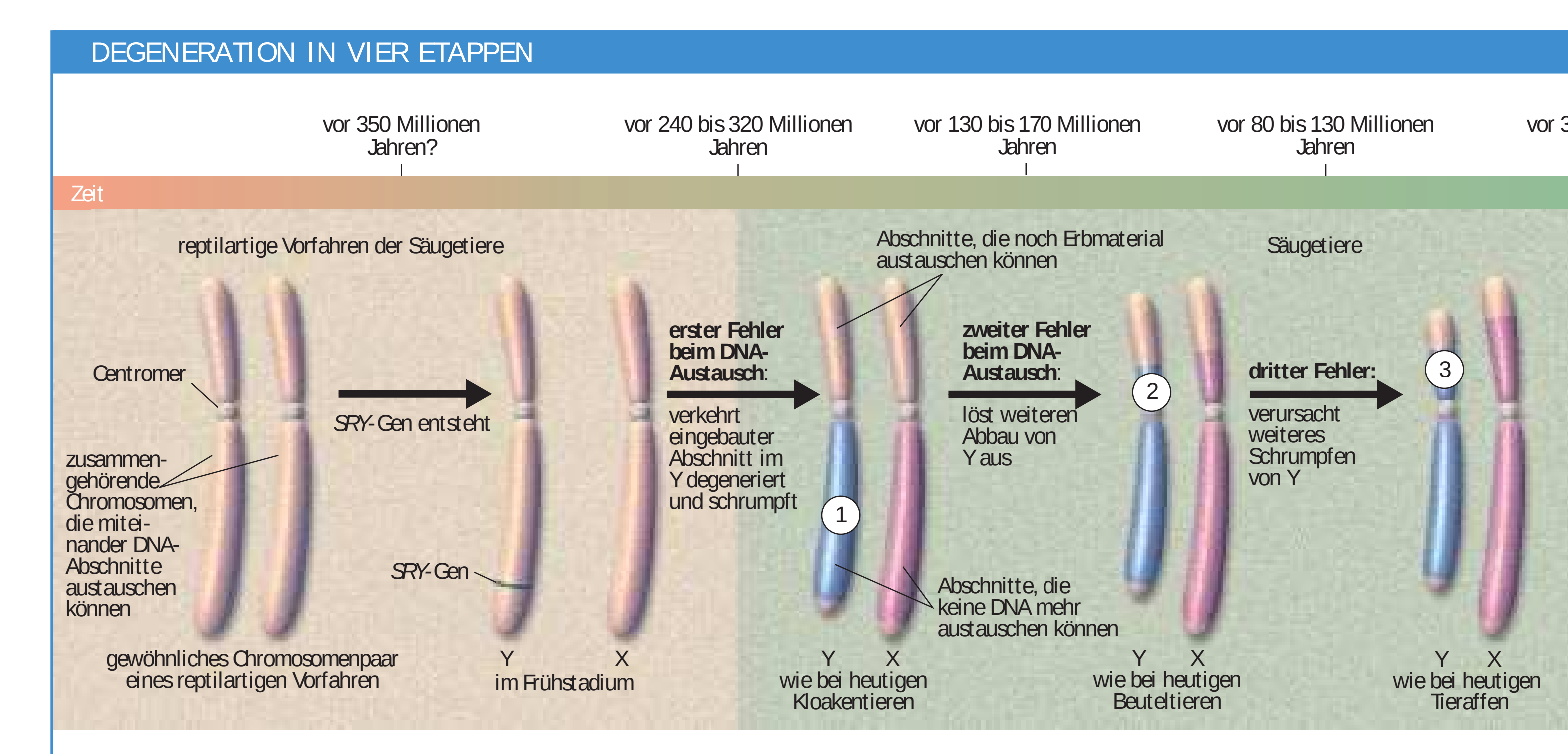
BIOPHOTO ASSOCIATES, PHOTO RESEARCHERS, INC.

ziffern. Die Reihenfolge der DNA-„Buchstaben“ in den 22 „normalen“ Sorten von Chromosomen sowie in X und Y ist nun weitgehend bekannt.

Ähnlich wie Paläontologen die Evolution einer Tierart nachvollziehen können, indem sie verwandte Skelette vergleichen, versuchen Molekularbiologen die Entwicklung von Chromosomen und Genen durch den Vergleich von DNA-Sequenzen zu rekonstruieren. Ihre Ergebnisse deuten nun auf eine erstaunlich bewegte Vergangenheit der Geschlechtschromosomen hin. Geprägt war sie von einer Reihe dramatischer struktureller Veränderungen im Y und ausgleichender Maßnahmen im X – einem Spiel, das sich zweifellos noch fortsetzt. Unerwartet für die meisten Biologen war auch, dass das menschliche Y-Chromosom deutlich mehr macht als nur den Mann zum Manne. Im Laufe seiner Jahrmillionen währenden Evolution hat das ziemlich geschrumpfte Gebilde sich eine Handvoll Gene bewahrt, die lebenswichtig sind für männliche Individuen. Mehr noch: Entgegen dem generellen Trend zum Schrumpfen hat es sogar Gene für die Fortpflanzungsfähigkeit des starken Geschlechts an sich gezogen.

Hinter solchen Forschungsarbeiten steckt zwar in erster Linie pure wissenschaftliche Neugier, aber auch der profane Wunsch, die Ursachen männlicher Unfruchtbarkeit zu ergründen und zu beheben. Die Entdeckung von Fertilitätsgenen auf dem Y-Chromosom könnte einmal zu neuartigen Behandlungsmethoden für Männer führen, bei denen diese Erbfaktoren fehlen oder defekt sind (siehe Kasten Seite 65).

Was wir heute über Geschlechtschromosomen wissen, ist aus rund hundert Jahren Forschung erwachsen. Noch gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren Biologen der Ansicht, dass bei Säugetieren – einschließlich des Menschen – äu-



Es begann vor vielleicht 350 Millionen Jahren: In einem unserer reptilartigen Vorfahren entstand auf einem Partner eines normalen Chromosomenpaars ein neues Gen, der „Männermacher" *SRY*. Mit jeder dann folgenden vier Etappen schränkte sich der Austausch von DNA-Abschnitten zwischen den Partnern weiter ein, weil ein Stück verdreht eingebaut wurde. Die Gene darauf verloren ihre Funktionsfähigkeit und verkümmerten. Nicht dargestellt sind vorübergehende Expansionsphasen, in denen das Y-Chromosom Gene von anderen Chromosomen in seine noch rekombinationsfähigen Regionen einbaute.

ßere Einflüsse auf den Embryo das Geschlecht bestimmen. Bei Schildkröten, Alligatoren und einigen anderen Reptilien ist das tatsächlich so. Hier lösen Temperatureinflüsse in einer frühen Phase der Embryonalentwicklung bislang nur unzureichend verstandene Abläufe aus, welche die Bildung von Männchen oder von Weibchen begünstigen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten Wissenschaftler jedoch, dass bei bestimmten Insektenarten Chromosomen über das Geschlecht entscheiden, und etwa zwanzig Jahre später konnten sie dann auch die Säugetiere in die Liste einreihen.

Was aber genau machte den Mann zum Mann? Theoretisch hätte es dem Y-Chromosom der Säuger beispielsweise bloß an „Weiblichkeit" fehlen können. Doch in den folgenden Jahrzehnten entpuppte es sich tatsächlich als „Männermacher". Auch wann es diese Eigenschaft erwarb, konnten die Forscher aus verschiedenen Indizien ableiten. X und Y mussten ursprünglich ein ganz normales Chromosomenpaar gewesen sein. Kurz bevor oder nachdem sich aber die ersten Säugetiere entwickelt hatten, kam es zu einer schicksalsträchtigen genetischen Veränderung in einem winzigen Abschnitt jenes Partners, der zum Y werden sollte. Von da an wurden Embryonen zu Männchen, wenn sie von einem Elternteil das künftige X und vom anderen das modifizierte Chromosom geerbt hatten. Zu Weibchen entwickelten sich dagegen jene, die zwei X-Vorläufer erhalten hatten.

Im Jahre 1990 lokalisierten Genetiker endlich exakt jenen Abschnitt auf dem menschlichen Y, der über die Ausprägung der männlichen Merkmale entscheidet. Es handelt sich um ein einziges Gen names *SRY*: für „sex-determining region Y", also „geschlechtsbestimmende Region Y". Wie Experimente mit Mäusen zeigten, trägt die Erbanlage den Bauplan für ein Protein, das im Embryo die Entwicklung der Hoden auslöst, indem es andere Gene auf verschiedenen Chromosomen aktiviert. Die Hoden bilden dann das Hormon Testosteron und andere Substanzen, welche die weitere Ausbildung der männlichen Geschlechtsmerkmale übernehmen.

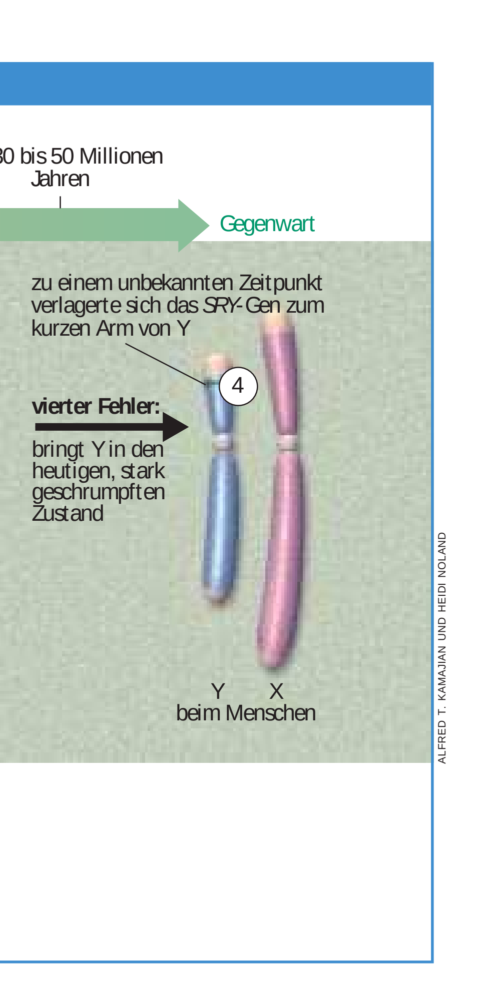
STECKBRIEF

Das Problem

Das „männliche" Y-Chromosom ist um zwei Drittel kleiner als das „weibliche" X-Chromosom. Über weite Strecken gleicht es einer Genwüste. Zudem kann es sich nur noch auf 5 Prozent seiner Länge mit dem X-Partner überkreuz legen, um Stücke auszutauschen. Wann geriet es in diese missliche Lage?

Die Lösung

Eine Art molekulare Uhr liefern noch funktionsfähige Y-Gene, die zwar Pendants auf dem X-Chromosom besitzen, aber nicht mehr ausgetauscht werden. Je länger zwei Gene schon ihre eigenen Entwicklungswege gehen, desto stärker unterscheiden sie sich gewöhnlich. Mit zunehmender Entzifferung des menschlichen Erbguts sind inzwischen genügend vergleichbare Genpaare auf beiden Geschlechtschromosomen aufgetaucht - mit verblüffendem Ergebnis.



ALFRED T. KAMAJIAN UND HEIDI NOLAND

Für die gemeinsame Herkunft der beiden Geschlechtschromosomen sprachen beispielsweise ihre übereinstimmenden Enden. Dort können sich X und Y noch wie alle anderen Chromosomenpaare parallel aneinanderlagern und passende Stücke austauschen. Dieser als „Rekombination“ bezeichnete Vorgang tritt bei der so genannten Reifeteilung der Zellen auf, aus denen beim Mann Spermien hervorgehen. In den meisten anderen Bereichen allerdings gleichen sich die beiden Geschlechtschromosomen mittlerweile kaum mehr: Rund 95 Prozent von Y nehmen nicht am Tauschgeschäft teil. Viele der darunter fallenden Gene besitzen jedoch entsprechende Gegenstücke auf X – ein weiterer Hinweis auf einen gemeinsamen Ursprung.

Nun sind Chromosomenpaare aber auf den internen partnerschaftlichen Austausch angewiesen, um ihre Struktur und Identität zu wahren. In Bereichen, die sich nicht daran beteiligen, sammeln sich nämlich schädliche Veränderungen der Erbsubstanz an, und die betroffenen Gene degenerieren schließlich oder verschwinden sogar. Schon seit längerem sahen Biologen darin den Grund, warum das Y heute wie ein Schatten seines früheren Selbst wirkt. Fraglos musste etwas den Austausch von DNA mit dem X-Chromosom großräumig zum Erliegen gebracht haben, worauf die betroffenen Gene von Y „kollabierten“. Die Frage war nur: Wie und wann kam es zu dem Stopp, nachdem das Ur-Y-Chromosom zum „Männermacher“ mutiert war?

Schritt für Schritt in die Misere

Die Suche nach einer Antwort dauerte Jahrzehnte, und erst in den letzten Jahren gelang es Forschern, viele der Wissenslücken zu schließen. So zeigten 1999 einer von uns (Lahn) und David C. Page vom Whitehead-Institut für Biomedizinische Forschung in Cambridge (Massachusetts), dass das Y seine Fähigkeit zum Austausch mit X überraschenderweise in mehreren Etappen verlor: Anfangs war nur eine kurze Strecke DNA um das frühe *SRY*-Gen herum betroffen, später weitere zusammenhängende Blöcke und schließlich fast das gesamte Chromosom. Während das Y dadurch „abbaute“, konnte das X weiter sein Erbgut mit Tauschgeschäften auffrischen; denn weibliche Individuen besitzen zwei X-Chromosomen, die bei der Reifeteilung ein passendes Paar bilden.

Ein Block DNA könnte auf einen Schlag seine Passung und damit seine Rekombinationsfähigkeit verlieren, wenn er sich beim Austausch dreht und dadurch falsch herum eingebaut wird. Ein solcher Fehler kommt gelegentlich vor und sollte schon sehr früh bei einem der ältesten Ahnen heutiger Säugetiere aufgetreten sein – als X und Y noch ziemlich gleich waren. Unserer Analyse nach entpuppte sich der postulierte Dreher aber eben nur als erster Streich. Wir verglichen dazu 19 Y-Gene – alle noch funktionierend, aber auf nicht mehr rekombinationsfähigen Regionen – mit ihren Gegenstücken auf dem X-Chromosom. Ohne ausgleichenden Austausch entwickeln sich die DNA-Sequenzen eines Genpaares für gewöhnlich auseinander: Je mehr Unterschiede zwischen ihnen bestehen, umso mehr Zeit ist demnach seit dem letzten Tauschhandel verstrichen. Ein solcher Vergleich liefert zunächst ein relatives Alter. ▶

Y-Gene ohne Gegenstück auf dem X, nur in den Hoden aktiv

Y-Gene mit Gegenstück auf dem X

SRY * (bestimmt männliches Geschlecht)

RPS4Y †
ZFY †
PCDHY

TTY1
TSPY

Folgen eines Verlustes von Y-Abschnitten

PRY
TTY1
TTY2
TSPY

AMELY

Centromer

Klein-wuchs

reduzierte Spermien-produktion

USP9Y †
DBY †
UTY †
TB4Y †
VCY ‡

CDY
XKRY

SMCY †
EIF1AY †
RBMY ‡

reduzierte Spermien-produktion

PRY
TTY2

RBMY ‡

reduzierte Spermien-produktion

DAZ
BPY2
PRY
CDY

Region ohne funktionelle Gene

Y-Chromosom

ALFRED T. KAMAJIAN UND HEIDI NOLAND

Rekonstruiert wurde die Evolutionsgeschichte von Y anhand funktionstüchtiger Gene in der nicht mehr rekombinierenden Region (blaue Abschnitte). Etwa die Hälfte dieser Erbanlagen besitzt Gegenstücke auf dem X (rot). Bei einigen handelt es sich um Gene des Grundstoffwechsels, die für die meisten Zellen überlebensnotwendig sind. Bestimmte andere Gene sind nur in den Hoden aktiv, wo sie wahrscheinlich die männliche Fertilität sichern helfen.

- Regionen, die noch DNA mit X austauschen
- * *SRY* veranlasst die Ausbildung von Hoden. Es leitet sich von einem Gen ab, das auch auf X vorkommt. Dieses Gegenstück – *SOX3* genannt – hat aber eine andere Aufgabe.
- † Gene des Grundstoffwechsels
- ‡ Gene mit Pendant auf dem X, die nur in den Hoden aktiv sind

Die so genannte X-Inaktivierung gleicht bei vielen Tierarten letztlich den Verlust von Genen auf dem Y-Chromosom aus. Sie entwickelte sich wohl Gen für Gen, höchstens für wenige gleichzeitig (Diagramm). Heute schalten die Weibchen einen Großteil der Erbanlagen auf einem ihrer beiden X-Chromosomen aus, um die Konzentration der entsprechenden Proteine auf dem gewünschten Wert zu halten.

ALFRED T. KAMAJIAN

Die von uns untersuchten X-Y-Genpaare ließen sich im Wesentlichen in vier zeitliche Gruppen einteilen. Innerhalb jeder einzelnen waren die geprüften Differenzen zwischen den Gen-Sequenzen von X und Y etwa gleich groß – ein Hinweis, dass der Austausch für alle etwa zum gleichen Zeitpunkt aufhörte. Die Gruppen selber waren jedoch deutlich verschieden voneinander. Die älteste – die mit den größten Unterschieden zwischen X- und Y-Genen – musste auf einen Zeitraum zurückgehen, in dem auch das *SRY*-Gen entstand.

Wann ursprünglich gleichartige Gene getrennte Wege einschlugen, lässt sich oft durch Vergleich der DNA verschiedener Tierarten grob abschätzen. Dazu konnten wir auf Erkenntnisse anderer Wissenschaftler zurückgreifen. Bei Reptilien aus einer Zeit, bevor die Entwicklungslinie der Säugetiere sich reich verzweigte, glichen sich demnach die Vorläufer von X und Y noch (Kasten Seite 62). Doch schon die Kloakentiere, zu denen der Ameisenigel und das Schnabeltier gehören, besitzen das *SRY*-Gen sowie eine benachbarte, nicht mehr rekombinierende DNA-Sequenz. Da dieser Zweig sich als einer der ersten vom Ast der übrigen Säugetiere getrennt hatte, müssten das Gen wie auch seine „verdrehte“ Nachbarschaft ungefähr mit dem Auftreten der Säugetiere entstanden sein, vor rund 300 Millionen Jahren also.

Auch die „molekulare Uhr“ der DNA liefert Informationen über den Zeitpunkt, wann eine Veränderung des Erbguts stattgefunden hat. Dazu benutzen Biologen einen Schätzwert, mit welcher Basisgeschwindigkeit sich die Sequenz ändert, sofern kein bestimmter Evolutions-



RAZI SEARLES, BRUCE COLEMAN INC.

Den Effekt der X-Inaktivierung demonstrieren dreifarbige Katzen (Foto). Das Gen, das über rote oder schwarze (oder besser: nicht rote) Fellfarbe entscheidet, liegt auf dem X-Chromosom. Weibchen mit der „roten“ Version auf einem X und der „schwarzen“ auf dem anderen entwickeln sich zu schwarz-rot gescheckten Tieren, wobei das Fleckenmuster durch das in jeder Zelle zufallsabhängige Abschalten eines der beiden X entsteht. Für die weißen Fellpartien ist hingegen ein anderes Gen verantwortlich.

druck einwirkt. Im Wesentlichen multipliziert man dann das gefundene Ausmaß der Unterschiede zweier DNA-Abschnitte mit dieser Rate und erhält so den wahrscheinlichen Zeitraum für das Ereignis. Auf diese Weise gelangten wir zu dem Ergebnis, dass sich vor 240 bis 320 Millionen Jahren der erste Dreher in das Y-Chromosom eingeschlichen hatte, der die Rekombination zwischen bestimmten X-Y-Genpaaren unterdrückte.

Der zweite derartige Fehler, in einem weiteren Bereich des Y, ereignete sich unseren Analysen zufolge vor 130 bis 170 Millionen Jahren: kurz bevor die Beuteltiere sich von der Entwicklungslinie abspalteten, die später zu allen Säugetieren mit hochentwickelter Plazenta führen sollte. Ein drittes Mal schlug das Schicksal vor 80 bis 130 Millionen Jahren zu, bevor die Plazentatiere sich in verschiedene Gruppen auffächerten. Die vorerst letzte DNA-Drehung auf Y liegt grob 30 bis 50 Millionen Jahre zurück, als die Tieraffen bereits eine eigenständige Linie, Menschenaffen und Hominiden aber noch nicht getrennt waren.

Um Ausgleich bemüht

Ganz gegen den Trend der meisten X-Y-Genpaare unterscheiden sich einige Proteine, welche die Zelle nach Anleitungen von Genen auf den verdrehten Y-Abschnitten produziert, erstaunlich wenig von den entsprechenden Produkten der X-Gene. Das trifft selbst auf jenen Bereich zu, der als erster falsch herum ins Y-Chromosom eingebaut wurde. Der Erhalt dieser Eiweißstoffe dürfte mit der einfachen Evolutionsregel zu begründen sein, dass überlebensnotwendige Gene gewöhnlich nur wenig Veränderung tolerieren. Tatsächlich haben sich auf dem Y hauptsächlich Gene des Grundstoffwechsels so konstant gehalten – sie sind unabdingbar für das korrekte Funktionieren fast jeder Körperzelle.

Nicht nur der gesunde Menschenverstand, auch eine ganze Reihe von Forschungsergebnissen sprechen dafür, dass der fehlende DNA-Austausch zwischen X und Y sowie die dadurch bedingte Degeneration des Y-Chromosoms durch einen ausgleichenden dritten Prozess kompensiert werden mussten. Zwar sind nicht alle Gene in jeder einzelnen Zelle des Körpers aktiv. Aber wenn eine Zelle ein bestimmtes Protein benötigt, schaltet sie für gewöhnlich sowohl die mütterliche als auch die väterliche Version des entsprechenden Gens an. Deren Produktionskapazität ist sorgfältig auf eine optimale Entwicklung und den täglich wechselnden Bedarf des Organismus abgestimmt. Daher hätte das Verschwinden von Y-Genen bei den Männchen die jeweilige Proteinproduktion fatal halbiert, wenn die betroffene Spezies sich nicht mit kompensatorischen Tricks beholfen hätte.

Viele Tierarten, darunter die Taufliege, verdoppeln in Männchen einfach die Aktivität der X-Version des verlorenen Y-Gens. Bei anderen Arten ist es komplizierter. Sie erhöhen zunächst bei beiden Geschlechtern die Aktivität der X-Gene. Dadurch wird zwar der Proteinspiegel der Männchen wieder aufgefüllt, bei den Weibchen entsteht jedoch ein Überschuss. Manche Tiere, zum Beispiel Fadenwürmer, halbieren dann in den Weibchen die Aktivität der X-Gene. Andere, und dazu gehören auch die Säugetiere, verlegen sich auf die so genannte X-Inaktivierung. Dabei werden schon ganz früh in einem weiblichen Embryo fast alle Gene auf einem der beiden X-Chromosomen abgeschaltet. Welches X es trifft, entscheidet sich nach dem Zufallsprinzip. In benachbarten Embryonalzellen können durchaus verschiedene X-Chromosomen stillgelegt werden, bei ▶

WEGE AUS DER MÄNNLICHEN STERILITÄT

Unfruchtbarkeit und die Pille für den Mann

Genetische Untersuchungen am Y-Chromosom tragen dazu bei, bestimmte Arten von Unfruchtbarkeit zu erklären. Bei etwa der Hälfte aller ungewollt kinderlosen Paare liegt das Problem ganz oder teilweise beim Mann. Bisweilen bildet er zu wenige oder gar keine Spermien – oft aus unklaren Gründen. Neuere Forschungsergebnisse lassen jedoch vermuten, dass in etwa zehn Prozent dieser Fälle ein oder mehrere Fertilitätsgene auf dem Y-Chromosom geschädigt sind.

Seit den siebziger Jahren vermuten Wissenschaftler einen Zusammenhang zwischen dem Y-Chromosom und männlicher Unfruchtbarkeit. Damals beobachteten sie in mikroskopischen Präparaten, dass vielen sterilen Männern kleine Stücke des Y-Chromosoms fehlten. Heute kennt man drei dafür spezifische Y-Regionen. Sie erhielten die Bezeichnung AZF a, b und c (das Kürzel steht für Azoospermie-Faktor). Der Verlust von DNA in einer dieser Regionen kann bereits zu Unfruchtbarkeit führen. Jede enthält mehrere Gene; die meisten davon sind in den Hoden hoch aktiv. Nach ihren Bauanleitungen produzieren die Zellen große Mengen von Eiweißstoffen. Es sieht daher ganz so aus, als spielten diese Gene irgendeine wichtige Rolle bei der Produktion der Spermien. Ihre Funktionen und ihr Zusammenspiel mit Fertilitätsgenen auf anderen Chromosomen müssen die Forscher allerdings noch genauer ergründen.



MARK HARMEL, STONE

Bestimmten Formen männlicher Unfruchtbarkeit kann die Reproduktionsmedizin bereits abhelfen: Ein Spermium wird dazu direkt in die Eizelle injiziert.

Einige Reproduktionsmediziner untersuchen inzwischen routinemäßig das Y-Chromosom auf fehlende Abschnitte. Hat ein Mann dieses Problem, produziert aber zumindest noch ein wenig Sperma, kann dem Paar mit der so genannten ICSI, der intracytoplasmatischen Spermien-Injektion, geholfen werden. Bei dieser Variante der Reagenzglas-Befruchtung entnimmt der Mediziner Spermien direkt aus den Hoden und injiziert sie in Eizellen der Frau. Wird auf diese Weise ein Sohn gezeugt, erbt er jedoch das geschädigte Y-Chromosom des Vaters und wird daher wahrscheinlich mit den gleichen Unfruchtbarkeitsproblemen zu kämpfen haben.

Vielleicht lässt sich eines Tages aber die Unfruchtbarkeit mancher Männer beheben, indem man die fehlenden AZF-Proteine zuführt oder sogar die zerstörten Gene wieder herstellt. Auf der anderen Seite sollte dieses Wissen auch die Entwicklung von Wirkstoffen ermöglichen, die gezielt die biochemische Maschinerie zur Spermienproduktion lahmlegen und damit als neue Verhütungsmittel für den Mann in Frage kämen.

Literaturhinweise

The Human Y Chromosome, in Evolution's Light. Von Bruce T. Lahn, Nathaniel M. Pearson und Karin Jegalian in: Nature Genetics, Bd. 27, S. 422, 2001.

Four Evolutionary Strata in the Human X Chromosome. Von Bruce T. Lahn und David C. Page in: Science, Bd. 286, S. 964, 1999.

A Proposed Path by Which Genes Common to Mammalian X and Y Chromosomes Evolve to Become X Inactivated. Von Karin Jegalian und David C. Page in: Nature, Bd. 394, S. 776, 1998.

Weblinks zum Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*

Teilungen geben sie allerdings ihr X-Inaktivierungsmuster an die Tochterzellen weiter (siehe Abbildung Seite 64).

Obwohl Biologen schon lange die X-Inaktivierung als eine Antwort auf den Abbau der Y-Gene angesehen haben, fehlten ihnen doch bisher die Beweise dafür. Einem von uns (Jegalian) und Page gelang vor wenigen Jahren ein Schritt in diese Richtung. Wir drehten den Spieß einfach um: Wenn Gene auf der nicht-rekombinierenden Region von Y noch funktionierten, dann müssten ihre Gegenstücke bei weiblichen Tieren von der X-Inaktivierung verschont bleiben, damit die weibliche Proteinkonzentration nicht hinter die männliche zurückfällt. Unsere Analyse bei zwei Dutzend Säugetierarten bestätigte dies tatsächlich. Wie sie ferner ergab, hatte die X-Inaktivierung sich nicht auf einen Schlag entwickelt. Vielmehr breitete diese sich ursprünglich abschnittsweise aus, vielleicht sogar nur Gen für Gen innerhalb eines Abschnitts, jedenfalls nicht mit einem Male über die ganze Länge des Chromosoms, wie es heute im Embryo geschieht.

Seltsamerweise liegen auf den nicht-rekombinierenden Regionen des Y-Chromosoms auch ein Dutzend Gene für die Fruchtbarkeit des Mannes. Sie tragen die Bauanleitungen für Proteine, die nur in den Hoden hergestellt werden und vermutlich an der Spermaproduktion mitwirken. Einige dieser Gene sind anscheinend von anderen Chromosomen auf das Y übergesprungen. Andere waren offenbar schon immer dort angesiedelt, dienten ursprünglich aber einem anderen Zweck und haben erst im Laufe der Zeit die neue Aufgabe übernommen. Die Degeneration ist also nur eine – wenn auch besonders auffällige – Seite in der Evolutionsgeschichte des Y-Chromosoms. Eine andere, aber bis vor kurzem kaum wahrgenommene Seite ist eben dieser Erwerb von Fertilitätsgenen.

Warum sich das Y regelrecht zum Magneten für Fruchtbarkeitsgene entwickelt hat, also welche Selektionskräfte es dazu gemacht haben, ist unklar. Für die Art als Ganzes mag es von Vorteil sein, wenn Gene, die weiblichen Tieren schaden könnten oder ihnen zumindest nichts nützen, gesondert aufbewahrt werden. Möglicherweise bietet das Y auch einen gewissen Schutz für die Fertilitätsgene, weil sie damit sicher von Männchen zu Männchen weitergereicht werden und Umwege über weibliche Individuen entfallen – diese könnten sich ihrer ja entledigen, ohne selber Schaden zu nehmen.

Geschlecht auf vielerlei Art

Ein weiteres Rätsel bleibt, wie die Fruchtbarkeitsgene es schaffen, ohne den sonst so wichtigen DNA-Austausch mit anderen Chromosomen intakt zu bleiben; schließlich sind viele ihrer „Nachbarn" auf Y an diesem Problem zugrunde gegangen. Die Lösung mag in der Tatsache liegen, dass fast jedes männliche Fertilitätsgen auf Y in mehreren Kopien vorliegt. Sie wirken als Sicherheitspuffer, da schädliche Mutationen meist nie in mehr als einem Exemplar gleichzeitig auftreten. Während manche Kopien Schäden ansammeln und schließlich ihre Funktionstüchtigkeit einbüßen, erhalten die übrigen die Fortpflanzungsfähigkeit des Mannes aufrecht und dienen gleichzeitig als Vorlagen für neue Kopien ihrer selbst.

Die Evolution der Geschlechtschromosomen haben Wissenschaftler zwar am gründlichsten beim Menschen untersucht. Doch haben sich solche Chromosomen nicht nur bei Säugern entwickelt, sondern unabhängig davon auch bei anderen Tiergruppen. Vögel und Schmetterlinge zum Beispiel verwenden das sogenannte W-Z-System der Geschlechtsbestimmung. Wenn ein singulär auftretendes Geschlechtschromosom den männlichen Organismus „macht", bezeichnen Biologen es als Y, den dazugehörenden Partner als X. Das W-Chromosom als „Single" macht dagegen aus einem Tier ein Weibchen; sein Gegenstück ist das Z. Bei diesem System sind also die Weibchen das „ungleiche" Geschlecht: mit der Kombination WZ. Männchen dagegen tragen ZZ. Vergleichende Betrachtungen dieser Verhältnisse bei den verschiedensten Arten erlauben es, einige allgemeine Prinzipien der Evolution von Geschlechtschromosomen abzuleiten.

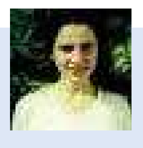
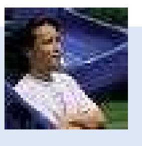
So entwickeln sich Geschlechtschromosomen bemerkenswerterweise immer aus einem gewöhnlichen Chromosomenpaar, keineswegs aber überall aus demselben. Die W- und Z-Chromosomen der Vögel entspringen zum Beispiel anderen Vorgängern als das X und Y der Säugetiere; nochmals andere Vorfahren besitzen das X und Y der Taufliegen.

Waren bei einer Art mit sexueller Fortpflanzung erst einmal Geschlechtschromosomen entstanden, lebte sich das Paar meist auseinander, wurde immer unähnlicher. Dabei durchliefen sie meist ein- oder mehrmals eine feste Abfolge von drei Entwicklungsschritten:

- Unterdrückung des DNA-Austausches,
- Degeneration der nicht-rekombinierenden Abschnitte des geschlechtsspezifischen Chromosoms Y oder W,
- Kompensation durch das andere Chromosom.

Damit einher ging oft eine zunehmende Bedeutung des geschlechtsspezifischen Chromosoms für die Fertilität, wie beim Y von Menschen und Insekten.

Welche Zukunft dem menschlichen Y-Chromosom beschieden ist, vermag niemand definitiv zu sagen. Theoretisch könnte der Zyklus sich fortsetzen, bis es eines fernen Tages ganz aus dem Erbgut verschwindet. Vielleicht baut das Y aber seine neu erkannte Rolle als Nische für spezielle Gene sogar noch aus. Wie auch immer, der Sonderling unter den Chromosomen wird weiterhin im Brennpunkt der biologischen und medizinischen Forschung stehen, wenn es darum geht, die Ursachen männlicher Unfruchtbarkeit zu ergründen und möglichst zu beheben. ■

***Karin Jegalian** und **Bruce T. Lahn** vollendeten ihre Dissertationsarbeiten im Labor des Genetikers David C. Page am Whitehead-Institut für Biomedizinische Forschung in Cambridge (Massachusetts) und am Massachusetts Institute of Technology. Jegalian arbeitet jetzt als Wissenschaftsjournalistin an den Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland). Lahn forscht am Howard-Hughes-Institut für Medizin und ist Professor in der Abteilung Humangenetik an der Universität Chicago.*



Künstliche Menschen

Automaten, Roboter, Homunkuli: Das Wechselspiel von technischem Fortschritt und seiner Entsprechung in der Literatur spiegelt sich wider in der Geschichte des „künstlichen Menschen". Oftmals waren die Schriftsteller auf der Höhe ihrer Zeit – mitunter nahmen sie reale Entwicklungen sogar vorweg.

Von Rudolf Drux

Als der Physiker Richard Seed aus Riverside bei Chicago 1997 ankündigte, Menschen nach Art des wenige Monate zuvor gezeugten Schafes „Dolly" klonen zu wollen, wurde er von Kollegen als „durchgedreht" bezeichnet. Die Absicht, aus einer lebenden Zelle eines erwachsenen Menschen dessen genetisch identisches Replikat herzustellen, könne praktisch nicht eingelöst werden.

Ein Artikel über Seed im „Spiegel" war damals mit „Furcht vor Frankenstein" überschrieben – womit auf den Prototyp jenes Forschers hingewiesen wurde, der bei Experimenten mit dem Leben rücksichtslos natürliche Grenzen überschreitet. Auch der Genforscher Craig Venter wurde verschiedentlich mit dem Titelhelden von Mary Shelleys Roman aus dem Jahr 1818 in Verbindung gebracht. Venters Privatfirma agierte bei der Entzifferung des menschlichen Erbguts flinker als das multinationale Humangenom-Projekt. Der Firmenchef durfte sich persönlich von jenem hochtönenden Satz angesprochen fühlen, den US-Präsident Bill Clinton am 26. Juni 2000 über die Fernsehkanäle in alle Welt sandte: „Wir lernen die Sprache, in der Gott Leben schuf."

„Die Sprache des Lebens lernen", „im Buch der Natur lesen", „das Alphabet des Werdens buchstabieren" – so oder ähnlich lauten die Wendungen, die derzeit häufig im Zusammenhang mit der Gentechnik gebraucht werden. Die Metaphern deuten ein Zusammenwachsen von Bio- und Informationswissenschaften an: Der Gegenstandsbereich der Molekularbiologie lässt sich erst dann durchdringen, wenn wir seine Kernelemente als „Nachrichten" begreifen, die empfangen, gespeichert und entschlüsselt werden können.

Der kultur- und technikgeschichtliche Rekurs auf die artifizielle Simulation und Reproduktion des Menschen eröffnet eine interessante Fragestellung: Stellt die gegenwärtige Verschmelzung von Informationsverarbeitung und Gentechnik jene entscheidende Neuerung dar, die einen Jahrhunderte alten Mythos möglicherweise seiner baldigen Verwirklichung zuführt?

Seit den Anfängen unserer Kultur gibt es belegbare Bestrebungen, spezifisch menschliche Fähigkeiten oder sogar den Menschen selbst technisch „nachzubauen". Unsere Ahnen verfolgten dieses Ziel auf dem Wege der (Al)Chemie und der angewandten Physik – von der Hydraulik bis hin zur Elektronik. Noch heute bezeugt die umgangssprachliche Aufteilung der Kunstgeschöpfe in „Retorten-" und „Maschinenmenschen" diese beiden Realisierungsversuche. Auch in der Literaturgeschichte hinterließen die künstlichen Geschöpfe ihre Spuren – und erreichten dort einen weitaus höheren Grad an Beweglichkeit und Lebensechtheit als in der handfesten Wirklichkeit. Doch so fantasievoll die literarischen Kunstmenschen auch ausgestaltet wurden – noch heute lassen sich an ihren poetischen Erscheinungsformen gut die verschiedenen Stadien der technischen Entwicklung ablesen.

In der griechischen Mythologie war der Schmiedegott Hephaistos für die Anfertigung künstlicher Geschöpfe zuständig. Seine Tätigkeit beschränkte sich also keineswegs auf die Herstellung prächtigen Geschmeides für die göttlichen Schwestern oder die Produktion von Blitzen für Göttervater Zeus. Nein – auch mit Rädern versehene Dreifüße, die von selbst zum Dienst bei den Olympiern anrollten, gehörten zum Repertoire. So jedenfalls entnehmen wir es dem wahrscheinlich im achten Jahrhundert vor Christus entstandenen „Ilias"-Epos des Dichters Homer. Für den eigenen „Gebrauch" schuf sich der hinkende Feuerbeherrscher zudem goldene Jungfrauen, die ihn stützen konnten, wann immer er seine vulkanische Werkstatt verließ.



Die klassische Verfilmung von Mary Shelleys „Frankenstein" durch James Whales (1931) spielt unter anderem mit dem Motiv des Feuer bringenden Prometheus. Der von Colin Clive verkörperte Titelheld begegnet seinem von Boris Karloff dargestellten Geschöpf.

ABBILDUNGEN: RUDOLF DRUX

Ganz offensichtlich hängt im mythischen Denken die Nachbildung menschlicher Wesen oder Eigenschaften von der Beherrschung des Feuers ab (Bild oben). Ohne dessen Nutzung erschien weder handwerkliche Produktion noch kulturelle Entfaltung denkbar. Von daher ist es verständlich, dass der Menschenschöpfer Prometheus, der unsere Spezies der griechischen Sage zufolge aus Ton und Regenwasser formte, auch erst einmal das Feuer vom Olymp stehlen musste, um das Überleben seiner Geschöpfe zu sichern.

Ebenfalls zu den sagenhaften Menschenbildnern zu zählen ist der attische Baumeister Daidalos. Seine Erfindungen jedoch sind bereits technisch nachvollziehbar. Die bekanntesten Errungenschaften waren sicher jene Fluggeräte, die ihm und seinem Sohn Ikaros die Flucht aus dem Reich des kretischen Königs Minos ermöglichten – wobei Ikaros allerdings tragischerweise abstürzte, als das Wachs, das die Federn seiner Flugmaschine zusammenhielt, in wärmeren Luftschichten plötzlich zu schmelzen begann. Aber Daidalos soll noch ganz andere Dinge konstruiert haben: Seine beweglichen Statuen etwa hätten aus der berühmten Mechanikerschule von Alexandrien stammen können. Dort wurden bereits im dritten Jahrhundert vor Christus mittels Luft- und Wasserdruck betriebene Automaten gebaut. Heron von Alexandria entwickelte die Maschinen im ersten nachchristlichen Jahrhundert weiter. Er fertigte Priesterfiguren an, die zu kultischen Zwecken Trankopfer bereiteten. Auch einen hydraulisch funktionierenden Herakles, der einen Pfeil auf einen Goldäpfel bewachenden Drachen abschoss, soll es gegeben haben (Bild nächste Seite).

Im ersten Jahrhundert unserer Zeitrechnung urteilte der sizilianische Geschichtsschreiber Diodor, die sagenhaften „Bildsäulen" des Daidalos hätten lebenden Wesen durchaus ähnlich gesehen – und genau das war von Anfang an das entscheidende Qualitätsmerkmal sämtlicher Androiden.

Der Begriff „Android" leitet sich von den griechischen Wörtern „anér" („Mann", „Mensch") und „eîdos" („Aussehen", „Gestalt") her und bedeutet so viel wie „des Menschen Abbild". Allerdings wurde er erst im Zeitalter des Absolutismus geprägt. Im 17. und 18. Jahrhundert trieben kunstreiche Uhrmacher den Nachbau des Menschen zu neuen Blüten. Die neuzeitlichen Kunstwesen konnten schreiben und musizieren (Bilder Seiten 71 und 72). So „menschlich" die Maschinen aber auch erschienen – ihre enorme gesellschaftliche Wertschätzung ist nur vor dem Hintergrund der Epoche zu erklären: Das mechanische Weltbild lieferte einerseits die theoretischen Grundlagen für die Konstruktion. Andererseits passten sie perfekt in das Weltbild der Aufklärung: Der Staat, die Natur und damit auch der Mensch selbst stellten nach Ansicht der Vertreter des aufgeklärten Materialismus mechanische Systeme dar, die ausschließlich den Gesetzen der Physik gehorchten: Neben anderen war es der französische Arzt, Anatom und Philosoph

Julien Offray de La Mettrie (1709–1751), der den cartesianischen Dualismus auflöste, demzufolge der Mensch sowohl über eine „Körpermaschine" („res extensa") als auch über eine Seele göttlichen Ursprungs („res cogitans") verfügen sollte. La Mettrie ging hingegen davon aus, dass es lediglich *ein* – nach mechanischen Regeln organisiertes – Seinsprinzip gebe. Für seine 1748 erschienene Abhandlung „Der Mensch als Maschine" standen die kunstvollen Androiden des Jacques de Vaucanson (1709–1782) Modell. Vor allem ein automatischer Flötenspieler, der zwölf verschiedene Stücke spielen konnte und dabei Lippen und Finger bewegte, hatte es La Mettrie angetan. Mit etwas „mehr Kunst", frohlockte er, könne man die Figur sicher auch zu einem „Sprecher" weiterentwickeln.

Die sozioökonomischen Konsequenzen, die die mechanisch-modellhaften Lebewesen seines Landsmanns nach sich zogen, ahnte La Mettrie allerdings nicht voraus. Vaucansons Kunstmenschen verschafften dem Erfinder, nachdem er sein Talent an ihnen erprobt hatte, große Aufmerksamkeit beim regierenden Adel und darüber eine Anstellung als königlicher Inspektor der Seidenmanufakturen zu Lyon. 1741, als er das Amt antrat, konstruierte er einen von Lochkarten gesteuerten Webstuhl, der die Textilherstellung zwar erheblich rationalisierte, aber gleichzeitig auch die Lebensbedingungen der Arbeiter verschlechterte.

Dass zwischen Androiden und Industriemaschinen ein produktionstechnischer Zusammenhang besteht, merkte schon der an technischen Phänomenen stets interessierte deutsche Romancier Jean Paul. Bei einem heiter-spöttischen Angriff auf die Schachspiel und Sprache simulierenden Apparate des Barons Wolfgang von Kempelen (1734–1804) stellte er 1789 fest: „Schon von ieher brachte man Maschinen zu Markt, welche die Menschen außer Nahrung sezten, indem sie die Arbeiten derselben besser und schneller ausführten. Denn zum Unglück machen die Maschinen allezeit recht gute Arbeit und laufen den Menschen weit vor."

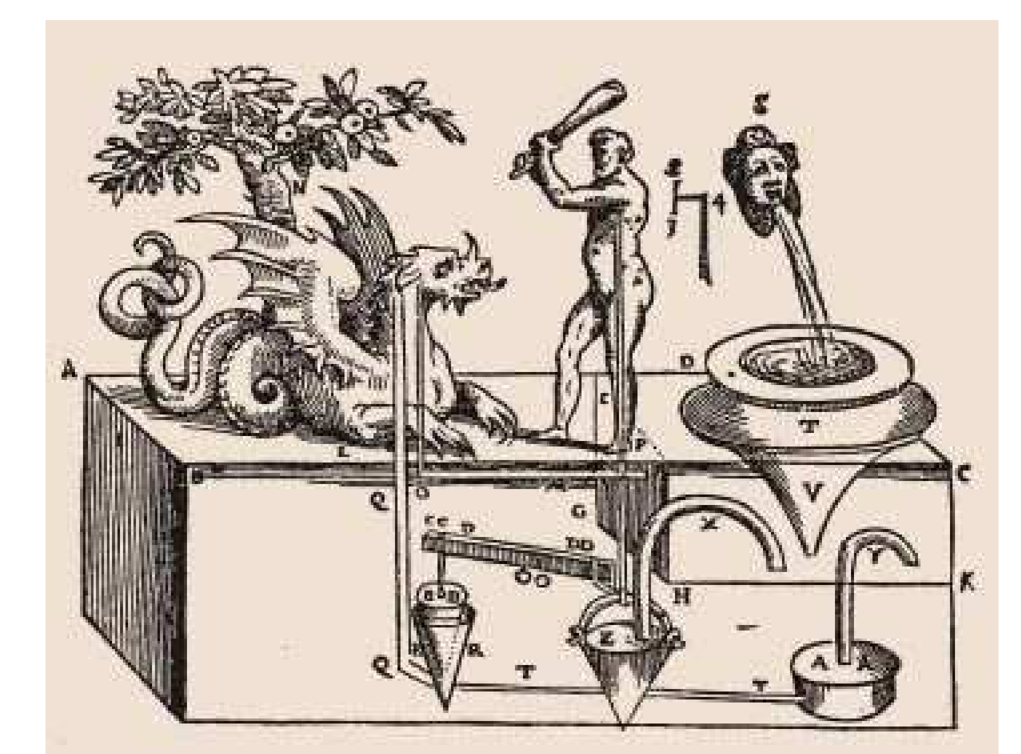
Maschinen statt Menschen

Im Zuge der Industrialisierung verlor sich das praktische Interesse der Techniker am Bau von Maschinenmenschen zunächst. Goethe lehnte es 1805 als nostalgisch ab, diese immer noch so zu bewundern, „als wenn seit jener Zeit die höhere Mechanik nichts frisches Bedeutenderes hervorgebracht hätte". Etwa ein halbes Jahrhundert später hielt der Physiker Hermann von Helmholtz (1821–1894) die zweifellos „scharfsinnigen" Bestrebungen, „Maschinen zu bauen, welche die tausend verschiedenen Dienstleistungen eines Menschen vollziehen", endgültig für erledigt. Die Zeit habe einen „fruchtbringenderen Weg" eingeschlagen und verlange nun „im Gegenteil, dass eine Maschine nur eine Dienstleistung, diese aber an Stelle von tausend Menschen, verrichte".

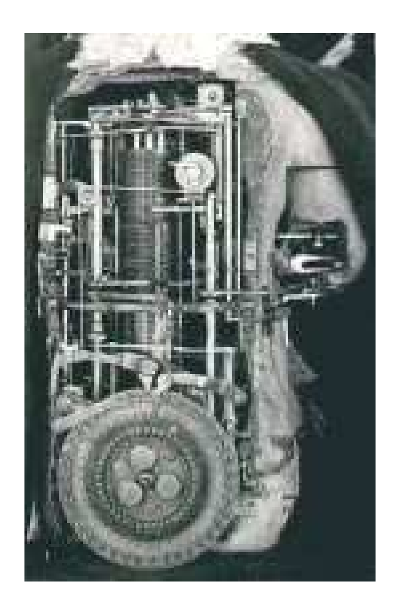
Das von Goethe apostrophierte Neue in der „höheren Mechanik" war in Gestalt der Dampfmaschine in die technikgeschichtliche Landschaft eingezogen, und mit der Veränderung der Antriebskraft wandelte sich das literarische Erscheinungsbild der anthropomorphen Kunstwesen ebenfalls. Dies musste auch der Titelheld in Karl Immermanns komischem Heldenepos „Tulifäntchen" von 1830 staunend feststellen: „Menschen schienen sie vollständig / Von gewohntem Fleisch und Beine, / Nur am Hinterkopf bemerkt er / eine Röhre, klein von Eisen, / Aus der Röhre stieg ein Rauch auf, / Zeichen ihrer innern Gluten, / Angefacht von Kohlefeuer". Ersonnen von einem „grübeltiefen" Ingenieur aus England – den sie als „Dampfbedienter" und „Dampffrau, die ihm förmlich angetraut war", auf diversen Reisen begleiten –, karikieren Immermanns Maschinenmenschen die Auswüchse der industriellen Revolution. Von England ausgehend, hatte diese nach dem Erlöschen von James Watts Patent auf die Dampfmaschine seit 1799 zunehmend auch auf dem Kontinent Fuß gefasst. Einen starken Aufschwung erfuhr sie, als von 1825 an englische Maschinen, Technologien und Fachkräfte auch in deutsche Territorien importiert wurden.

Nach der Wärmekraft war es die Elektrizität, die den Automatenbau beherrschte. 1892 schilderte Jules Vernes in seinem Roman „Das Karpatenschloß" die überraschende Wiederkehr der toten Sängerin Stilla, die einst während einer Arie auf der Opernbühne zusammengebrochen war. Ihr plötzlicher Auftritt in einem halb zerfallenen Schloss, der durch die Projektion ihres Bildes auf eine Spiegelwand und ein Phonogramm höchst lebendig wirkt, mutet ihren Bräutigam von einst verständlicherweise gespenstisch an. Der arme Mann kennt den Phonographen noch nicht – eine Maschine, die mittels einer Paraffinwalze Schallwellen aufzeichnete und im Dezember 1877 von Thomas Alva Edison entwickelt worden war. Der amerikanische Erfinder war auch als Person eine dankbare Erzählfigur, denn glaubhaft konnten ihm die erstaunlichsten Ideen und deren Realisierungen zugeschrieben werden. Sogar den Bau einer „Eva der Zukunft" trauten ihm zeitgenössische Schriftsteller zu, wie der gleichnamige Roman des französischen Symbolisten Villiers de l'Isle-Adam von 1886 belegt. Unter Verwendung der neuesten Errungenschaften der Elektrotechnik fertigt der Roman-Erfinder für den dandyhaften englischen Lord Ewald als Ersatz für dessen schöne, aber geistlos-gewöhn-

Wenn Herakles mit der Keule auf den Kopf des Drachen schlägt, speit ihm dieser zischend Wasser ins Gesicht. 1589 rekonstruierte Giovanni Battista Aleotti das antike hydraulische Automatenensemble des Heron von Alexandria (1. Jahrhundert nach Christus).







Der „automatische Schriftsteller“ von Pierre Jaquet-Droz und Jean-Frédéric Leschot aus dem Jahr 1773 ist in der Lage, sich und seine künstlichen Geschwister auszuweisen, indem er schreibt: „Wir sind die Androiden Jaquet-Droz.“ Die Rücken-ansicht offenbart einen aus zwei Räderwerken bestehenden Mechanismus, der den Automaten dazu befähigt, Texte von bis zu 40 Zeichen Länge abzufassen.

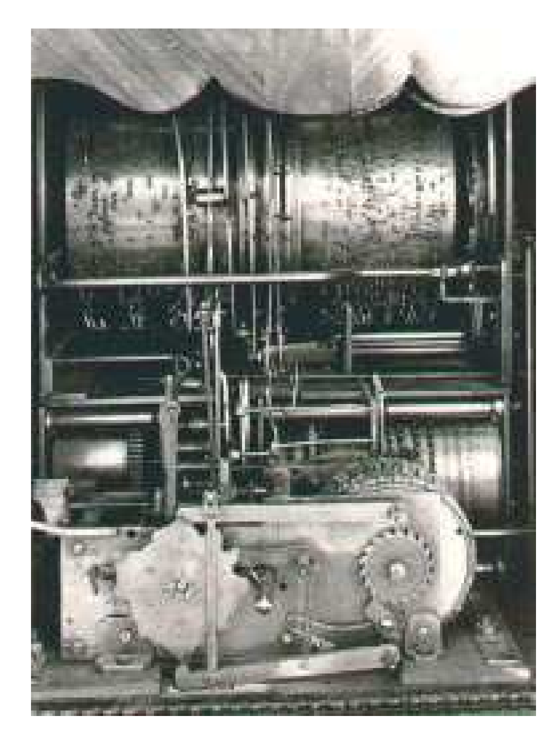


liche Freundin das „elektrische Ideal“ einer Frau an (vergleiche Bild Seite 73). Dieser Gestalt gewordenen Männerfantasie sind „zwei Goldphonographen“ in den Brustkorb implantiert, deren Tonrollen bei Bedarf stundenlang subtile Dichterworte abspulen, wovon der Lord in der Tat einen Beitrag zur Hebung des Konversationsniveaus erwarten darf. Bevor sie der feinen Gesellschaft aber überhaupt präsentiert werden kann, kommt die Dame bei einem Schiffsbrand tragischerweise ums künstliche Leben.

In diesem Schluss, das heißt bei ihrer Vernichtung durch das reinigende – und zum Beseitigen von Hexen(werken) lange schon bewährte – Feuer, drückt sich natürlich auch das moralische Unbehagen an der frevelhaften Unternehmung aus, Gott ins Handwerk zu pfuschen. Und so müssen die vermessenen Menschenbildner seit alters her mit dem Verlust ihrer Schöpfungen oder sogar mit Leib und Seele bezahlen. Den Präzedenzfall lieferte auch hier Prometheus, der für sein selbstloses Tun an einen Felsen im Kaukasus gekettet wird, wo ihn täglich ein Adler aufsucht, um die über Nacht nachgewachsene Leber aufs Neue zu fressen. Sein modernes Pendant, Mary Shelleys Romanheld Doktor Frankenstein, büßt für den unstillbaren Drang nach künstlicher Erzeugung von Leben kaum weniger hart: Sein aus totem Körpermaterial komponiertes Geschöpf empfindet zwar menschlich und sehnt sich nach Liebe und Geborgenheit. Weil ihm diese aber verwehrt bleiben, rottet das Monster alle Menschen, die seinem Schöpfer nahe stehen, aus. In die Weite des ewigen Eises gehetzt, wird Frankenstein zuletzt selbst Opfer seiner Kreatur. Damit passte Mary Shelley dem Romanende ein Grundmotiv literarischer Technikdarstellung ein: die Unkontrollierbarkeit des natürliche Grenzen überschreitenden Forschungswerkes.

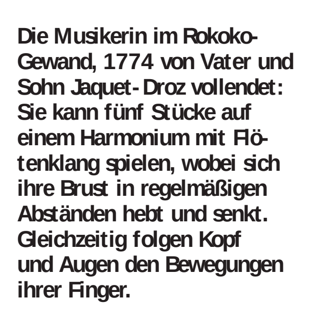
Heute verhängen Schriftsteller – die sich nun mit den Ergebnissen und Zielen der Reproduktionstechnologien auseinander zu setzen haben – nicht mehr derart drakonische Strafen. Vielmehr gehen sie vorzugsweise auf die sittlich-sozialen Folgen technisch-naturwissenschaftlicher Innovationen ein. Diese Akzentverschiebung hängt unter anderem damit zusammen, dass sich der Realitätsanteil bei der Rekonstruktion menschlicher Wesenszüge und Eigenschaften bis in die Gegenwart erheblich vergrößert hat. Beispielsweise wird dies an den modernen Automaten sichtbar, deren Entwicklung wir der Nachrichtentechnik und der elektronischen Datenverarbeitung verdanken: Von Mikroprozessoren gelenkte Roboter verrichten Tätigkeiten von Facharbeitern, indem sie zum Beispiel Kraftfahrzeugkarossen schweißen und lackieren; „intelligente“ Rechenmaschinen können bereits Muster erkennen und geometrische Figuren klassifizieren.

Früher, so berichtete Garri Kasparow 1996, hätte er über die Frage gelacht, ob Computer über eine Art Intelligenz verfügen. Dann aber verlor er gegen den









Die Musikerin im Rokoko-Gewand, 1774 von Vater und Sohn Jaquet-Droz vollendet: Sie kann fünf Stücke auf einem Harmonium mit Flötenklang spielen, wobei sich ihre Brust in regelmäßigen Abständen hebt und senkt. Gleichzeitig folgen Kopf und Augen den Bewegungen ihrer Finger.

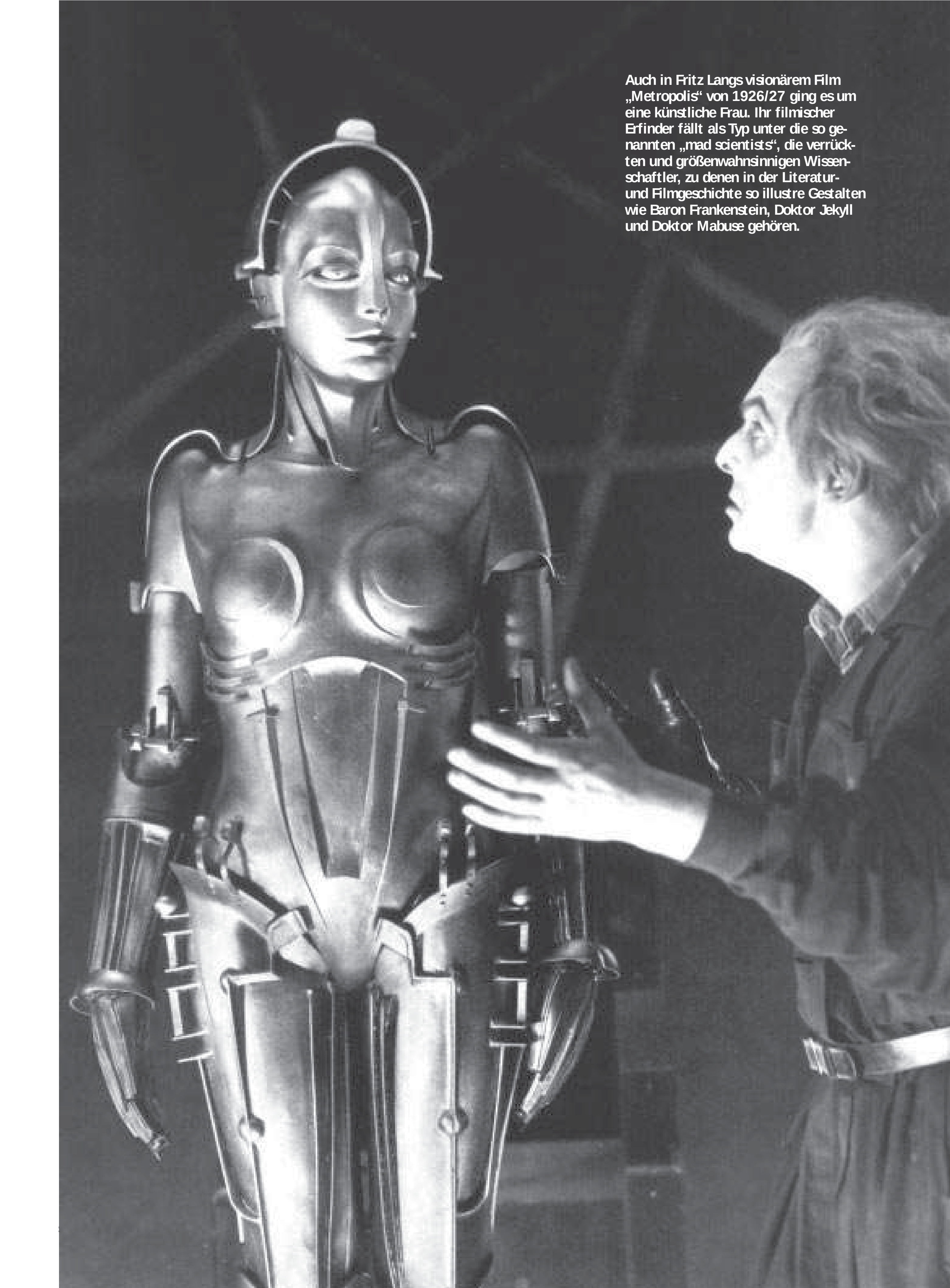


Schachcomputer „Deep Blue“, weil sich sein Kontrahent für einen Rechner untypisch verhielt: Statt wie üblich nach einfachen Materialvorteilen vorzugehen, opferte er einen Bauern, ohne jedoch unmittelbar davon zu profitieren. Erst im weiteren Verlauf der Partie wurde der strategische Vorteil, der sich aus diesem Zug ergab, offenkundig – Kasparow jedenfalls erschien er intuitiv richtig, originell und hoch intelligent. Da das, was der Mensch „aus einem Gefühl heraus“ gemacht hätte, von einer Maschine *errechnet* worden war, so der Schluss des Weltmeisters, müsse von einem bestimmten Punkt an „zumindest im Schach immense Quantität in Qualität umschlagen.“ Anhand der Züge könne er kaum noch entscheiden, ob ein Mensch oder ein Computer spiele.

Wer die Geschichte der Simulationsversuche betrachtet, wird den Automatenbauern insgesamt größere Erfolge und öffentlichkeitswirksamere Leistungen bescheinigen als den Anhängern der so genannten Arkanwissenschaften (lateinisch „arcanum“ für „Geheimnis“), denen es darum ging, den Menschen selbst künstlich zu erschaffen. Zwar war der Homunkulus der Alchimisten in erster Linie nicht mehr als ein Gedankenexperiment, gleich bedeutend mit dem „Stein der Weisen“ oder dem „Elixier des Lebens“. Und dennoch führte der magisch-alchemische „Eingriff in die Natur“, den der Philosoph Ernst Bloch (1885–1975) später als die „älteste intendierte Form von Technik“ bezeichnete, zu Verfahrensweisen und Apparaturen, die noch der empirischen Naturwissenschaft von Nutzen waren.

Die bekannteste Rezeptur zur Erzeugung eines Menschen außerhalb des Mutterleibs stammt von dem Arzt und Naturphilosophen Theophrastus Bombastus von Hohenheim, genannt Paracelsus. Um 1530 unterzog er das Sperma eines Mannes in einem kürbisartigen Gefäß mit Hilfe von Pferdemist einem Fäulnisprozess – der so genannten „putrefactio“. Beim Verbleib „in steter gleicher Wärme“ und mit Menschenblut genährt, ergebe dies nach vierzig Tagen „ein recht lebendig Kind“, das jedoch „viel kleiner“ sei (deshalb lateinisch „homunculus“ für „Menschlein“), als „das von einem Weibe geboren wird“.

Die radikalen Gedankenspiele des Hohenheimers, der letztlich über einen von Geburt an fehlerlosen Menschen reflektierte, hatten indes wenig zu tun mit der auf dem Alchimistenherd nachvollzogenen Urzeugung, das heißt der Entwicklung von Organismen aus anorganischen Stoffen. Bei seiner „Generation der homunculi“ ging Paracelsus nämlich vom Sperma, einer unbestreitbar organischen Substanz, aus – wobei er sich an die im frühen 16. Jahrhundert immer ▶



Auch in Fritz Langs visionärem Film „Metropolis“ von 1926/27 ging es um eine künstliche Frau. Ihr filmischer Erfinder fällt als Typ unter die so genannten „mad scientists“, die verrückten und größenwahnsinnigen Wissenschaftler, zu denen in der Literatur- und Filmgeschichte so illustre Gestalten wie Baron Frankenstein, Doktor Jekyll und Doktor Mabuse gehören.

Literaturhinweise
Der Frankenstein-Komplex. Kulturgeschichtliche Aspekte des Traums vom künstlichen Menschen. Von Rudolf Drux (Hg.). Suhrkamp, Frankfurt/Main 1999.
Die Prozedur. Roman. Von Harry Mulisch. Hanser, München 1999.
Künstliche Menschen. Dichtungen und Dokumente über Golems, Homunculi, Androiden und lebende Statuen. Von Klaus Völker (Hg.). Suhrkamp, Frankfurt/Main 1994.
Menschen aus Menschenhand. Zur Geschichte der Androiden – Texte von Homer bis Asimov. Von Rudolf Drux (Hg.). Metzler, Stuttgart 1988.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

noch gültige Lehrmeinung des Aristoteles hielt, dass die Vererbung allein Sache des männlichen Samens sei. (Erst im späten 19. Jahrhundert wurde die genetische Bedeutung der Eizelle erkannt.)

Goethe hingegen griff für die Menschenfabrikation im mittelalterlichen Laboratorium seines „Faust II“ von 1832 eindeutig auf das „große Werk“ („opus magnum“) der Alchimisten zurück (siehe nebenstehendes Bild). Das ist sowohl den Vorgängen in der Phiole als auch den Fachbegriffen zu entnehmen, mit denen der begeisterte Adept Wagner sein Verfahren beschreibt: „Es leuchtet! Seht! – Nun lässt sich wirklich hoffen, / Daß wenn wir aus viel hundert Stoffen / Durch Mischung – denn auf Mischung kommt es an – / den Menschenstoff gemächlich komponieren / In einen Kolben verlutieren [mit Lehm verschließen] / Und ihn gehörig kohobieren [mehrfach destillieren], / So ist das Werk im stillen abgetan“.

Natürlich inszenierte Goethe hier – im gotischen Laboratorium – eine kulturgeschichtlich dazu passende Tätigkeit. Zugleich schaltete er sich aber auch in einen zu seiner eigenen Zeit schwelenden naturwissenschaftlichen Disput ein: Als 1828, im Jahr des Entwurfs der Homunkulus-Episode, dem Chemiker Friedrich Wöhler (1800–1882) die synthetische Herstellung von Harnstoff gelang – womit durch „verständiges Probieren“ (Wagner) der Natur das Geheimnis organischen Wachstums entlockt zu sein schien –, glaubten nicht wenige Zeitgenossen, dass durch die künstliche Gewinnung eines Stoffwechselproduktes endlich der Weg zum künstlichen Menschen gebahnt sei. Solchen Vorstellungen wirkte Goethe mit der dramatischen Anlage seiner Homunkulus-Figur aber gerade entgegen. Das Menschlein im Reagenzglas möchte, obwohl oder weil selbst aus der Urzeugung im alchimistischen Labor hervorgegangen, „gerne im besten Sinn entstehn“. Und so vermischt es sich mit den Wellen des Meers, aus dem doch „alles Leben entsprungen“, bevor es sich nach den „ewigen Gesetzen der Natur“ in „tausend und abertausend Formen“ entfaltet.

Dass der technisch herstellbare Mensch mittlerweile von den Höhen künstlerischer Fantasie in die Ebenen alltäglicher Wirklichkeit herabgestiegen ist, wird wohl nirgendwo so offensichtlich wie in der Reproduktionsmedizin. 1888 war die Übertragung eines Embryos in eine Leihmutter eine so wunderliche und schräge Vorstellung, dass sie der österreichische Schriftsteller Robert Hamerling (1839–1889) als knalligen Aufhänger für eine Satire auf die Technikeuphorie der Gründerzeit verwenden konnte. Der Titelheld seines „Homunculus“-Epos zeigt sich – wie gehabt – als geistig hoch entwickelt, weist aber gewaltige „leiblich-materielle Defizite“ auf. Daher muss er auf natürlichem Wege nachgebessert werden. Sein Vater, ein gelehrter Doktor der Chemie, führt ihn zu diesem Zweck „auf das erste / Urprinzip vitalen Daseins, / Wie er glücklich es erfunden“, zurück, nämlich auf ein „zartes Protoplasma-Klümpchen“. „Sacht’ den Embryo verpflanzt er“ danach „in den Mutterschoß der Gattin / Eines armen Dorfschulmeisters“.

Der „geheimnißvolle“ Embryonen-Transfer – damals eine ebenso komisch anmutende Fiktion wie die erwähnte mittellose Leihmutter – ist längst harte Realität. Die entsprechenden menschlichen und juristischen Probleme wurden wohl zum ersten Mal 1987 einer breiteren Öffentlichkeit bewusst: Beim so genannten „Baby-M“-Prozess im amerikanischen New Jersey wurde ein Kind nicht der leiblichen Mutter, sondern der Auftraggeberin zugesprochen. In der anschließenden Diskussion erläuterten Mediziner etwa ein Dutzend Möglichkeiten, die natürliche Zeugung zu umgehen, um eine künstliche Befruchtung vorzunehmen. Sogar die extra-uterine Schwangerschaft sagte man für die nahe Zukunft voraus. Auch wenn sich diese Prognose bislang nicht erfüllt hat – der künstliche Uterus ist technologisch noch nicht ausgereift –, drängt sich doch angesichts ständig erweiterter und verfeinerter Methoden der In-vitro-Fertili-



Erschaffung des Homunkulus („Menschlein“) im Reagenzglas. Die Federzeichnung stammt von Franz Stassen (1916) nach der entsprechenden Szene in Goethes „Faust II“ (1832).



Die Anpassung perfekter Prothesen und die Implantation von Biochips in der medizinischen Praxis wird von der Science-Fiction bis zu der (noch) fiktiven Gestalt des „Cyborg" (kybernetischer Organismus) weiter getrieben. Hier der von Yul Brynner gespielte Roboter-Revolverheld aus dem Film „Westworld" von Michael Crichton.

sation bisweilen der Gedanke an Aldous Huxleys „Schöne neue Welt" von 1932 auf. Darin wird die Frau bekanntlich nicht von einem Kind, sondern von der Geburt selbst entbunden, damit die pränatale Konditionierung der Nachkommen auf ihre künftigen sozialen Funktionen hin nicht gefährdet wird. Es ging bei Huxley mit anderen Worten um Züchtung, um die Kultivierung eines Menschenparks, und weniger um die Techniken extrakorporaler Befruchtung. (Hierfür schien dem Autor gemäß dem biologischen Wissensstand seiner Zeit noch die Entnahme der Eierstöcke vonnöten.)

Geburt in der Retorte

Aber die künstliche Zeugung, ursprünglich gedacht als Hilfe für unfruchtbare Paare, kommt tendenziell auch eugenischen Gelüsten entgegen. Dass sie jedenfalls eng mit Manipulationen an (überzähligen) Embryonen zusammenhängt und genetischen Eingriffen eine gleichsam operationale Basis verschafft, hat Johannes Mario Simmel in der kombinierten Liebes- und Kriminalgeschichte „Doch mit den Clowns kamen die Tränen" 1987 dargestellt.

Angesichts der politischen Brisanz und der sozioökonomischen Relevanz der Thematik müsste der Homunkulus-Mythos, der von der Erzeugung des Menschen in der Retorte erzählt, neu gelesen werden – als kulturgeschichtliches Vorspiel heutiger Versuche der Fortpflanzungsmedizin und Humangenetik. Schon bei Paracelsus beschrieb der Mythos den Menschen als Ausgangsmaterial (input) und Endergebnis (output) eines Produktionsprozesses – und genau das bezeichnete der Kulturanthropologe Günther Anders 1980 vor dem Hintergrund der reproduktionsmedizinischen Praxis und der gentechnologischen Fortschritte als eine weitere „industrielle Revolution" – bei der der behandelte „Rohstoff" eben der Mensch sei.

Anders' Betrachtung ist einseitig, zweifellos, und will es auch sein, weil ihm die Gefahren, die der Menschheit seiner Meinung nach durch die humangenetischen Unternehmungen drohen, jeden Gedanken an einen potenziellen medizinischen Vorzug rauben. Nicht zuletzt erinnert sein hartes Urteil an die Verdammung des Doktor Frankenstein, und das kritische Vokabular ließe sich ohne weiteres auch zur Bewertung der Monsterfabrikation verwenden. Allein – deren fanatischer Vollstrecker war ebenso fiktiv wie sein missratenes Geschöpf.

Aktuelle Bearbeitungen des Frankenstein-Stoffs beziehen sich natürlich in erster Linie auf die Fortschritte der Molekularbiologie. In dem 1998 publizierten Roman „Die Prozedur" des niederländischen Schriftstellers Harry Mulisch gelingt es dem Chemiker Victor Werker, „einen primitiven Organismus aus anorganischer Materie" im Labor herzustellen. Indem er über seine Nobelpreis würdige Entdeckung des „Eobionten" in Briefen an eine imaginierte Adressatin berichtet – seine tot geborene Tochter Aurora –, wird dem Wissenschaftler klar, dass er, der „weltberühmte Lebenmacher", stets die Flucht ergreift, wann immer „der Tod auf dem Programm steht". Bemerkenswerterweise hat Mulisch Werkers äußerst vielschichtige Lebens-Geschichte erzählerisch an solche Mythen angeschlossen, in denen Schöpfung an Sprache gebunden ist: den Schöpfungsbericht des Johannesevangeliums beispielsweise, demzufolge am Anfang das göttliche Wort steht, oder die Sage vom Golem, jener Diener- und Helfer-Gestalt jüdisch-kabbalistischer Tradition, die, aus einem Erdenkloß geformt, ebenfalls durch die Kraft des göttlichen Wortes belebt wird. Mulischs Protagonist entwickelt die „allereinfachste unabhängige Lebensform". Fast hätte Craig Venter dafür Pate stehen können, denn Anfang 1999 – Mulischs Roman war gerade erschienen – kündigte er an, die (nur) 470 Gene, mit denen das primitive Bakterium *Mycoplasma genitalium* ausgestattet ist, so lange zu sondern, zu überprüfen und auszusortieren, bis er diejenigen Erbinformationen erfasst habe, die allein für das Leben des Parasiten verantwortlich sind. Erinnern wir uns: Das größte Geheimnis der Natur, die „Ursache allen Lebens", zu lösen – war das nicht auch Frankensteins erklärtes Ziel?

Bis in die unmittelbare Gegenwart hinein hat die Dichtung also die Versuche zur technischen Reproduktion des Menschen und die Experimente mit dem menschlichen Leben begleitet. Zumeist wurden dabei die jeweiligen technischen Möglichkeiten der Zeit reflektiert, mitunter aber auch antizipiert (Bild auf dieser Seite). Da die Kunstmenschen den jeweiligen Stand der technischen Entwicklung widerspiegeln und sich mit ihr wandeln, überschneiden sich hier Linien der Literatur- und Technikgeschichte. An den Schnittstellen lassen sich die verschiedenartigen – ökonomischen, politischen, medizinischen – Motivationen ablesen, die die Hervorbringung von Retorten- oder Maschinenmenschen jeweils veranlassten. Auf diese Weise in seiner geschichtlichen Bedingtheit erkannt, wird der „Homo replicatus" einer kritischen Betrachtung zugänglich. Zugleich stellt sich mit der permanenten Verbesserung der Replikate und Simulationen erneut die Frage nach dem, was den Menschen ausmacht – und was eben nicht technisch herzustellen oder nachzuahmen ist.

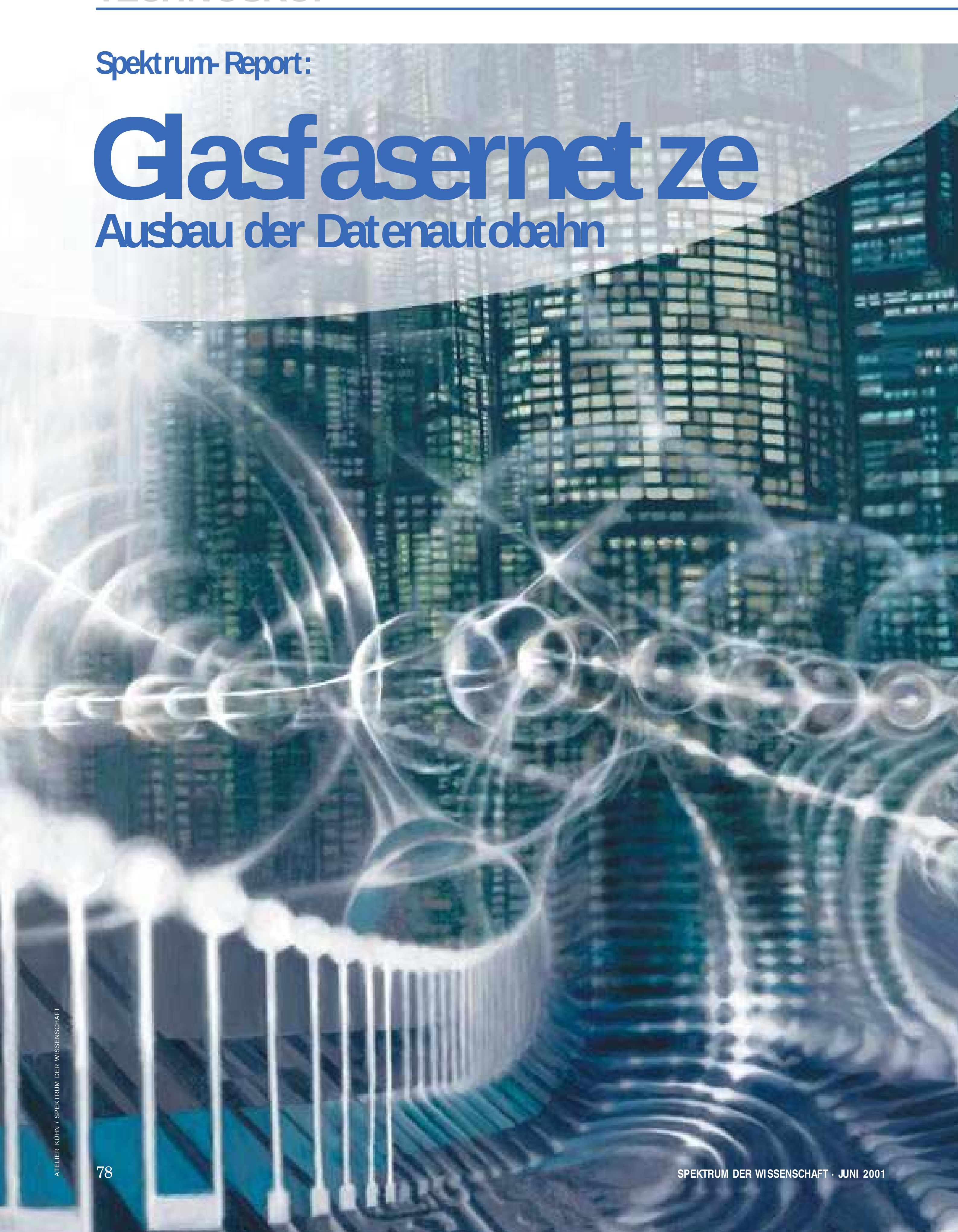


***Rudolf Drux** ist Professor für Neuere Deutsche Literaturgeschichte und Allgemeine Literaturwissenschaft an der Universität Köln. Zu seinen Forschungsgebieten zählt die Geschichte literarischer Motive, unter anderem die des künstlichen Menschen.*

Spektrum-Report:

Glasfasernetze

Ausbau der Datenautobahn



ATELIER KÜHN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Die nächste Daten-Sintflut kommt bestimmt, davon sind Internet-Professionals überzeugt. Schon heute fließen auf den Hauptleitungen etwa eine Billion Bit pro Sekunde, das 10000fache könnte es in naher Zukunft werden. Um die erforderlichen Kapazitäten zu schaffen, werden bestehende Glasfasernetze ausgebaut und optimiert, doch das allein reicht nicht: Denn immer wieder muss das Lichtsignal einen Umweg über elektronische Bausteine machen, und das hält auf. Wie ein durchgängig optisches Netzwerk beschaffen sein könnte, schildert dieser Report.

Inhalt

PERSPEKTIVEN

Mehr Licht!

Gegen die Daten-Sintflut in Kommunikationsnetzen setzen die Entwickler auf den Ausbau der Glasfasernetze und rein optische Vermittlungsknoten.

Von Gary Stix

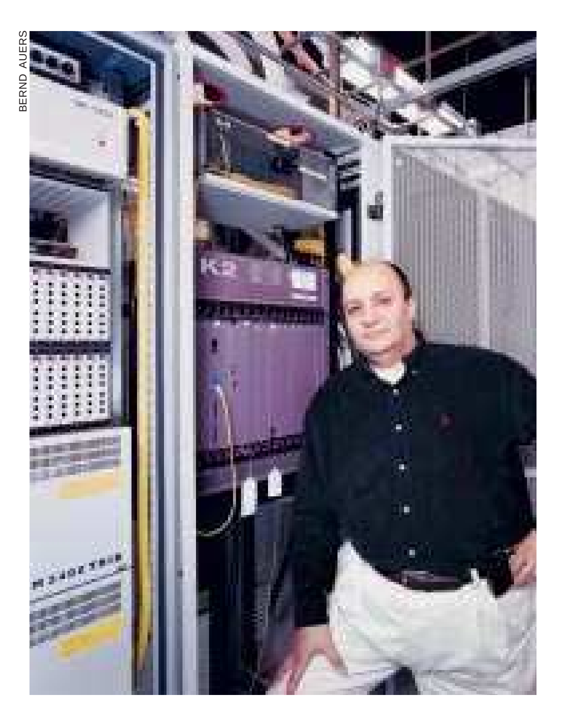
Der Schrecken trägt viele Namen, etwa „Video-Napster“ oder „Virtual Reality“. Ihnen gemein sind Prognosen künftiger Datenströme im Internet, gegen die der gegenwärtige Verkehr auf den Hauptleitungen mit einer Billion Bit pro Sekunde geradezu lächerlich wirkt – das 10000fache könnte fließen, wenn Cineasten Kinofilme via World Wide Web austauschen oder online in künstlichen Fantasiewelten gegeneinander antreten.

Dass solche Szenarien prinzipiell möglich sind, weiß jeder, der zu „Stoßzeiten“ im Internet unterwegs ist und sich die Übertragungskapazitäten mit Tausenden Nutzern teilen muss. Um den absoluten Datenstau zu vermeiden, versuchen Wissenschaftler weltweit neue Technologien zu entwickeln beziehungsweise aus den vorhandenen das letzte Quäntchen an Bandbreite herauszuholen. Vielversprechendster Kandidat ist die Glasfasertechnologie, die heute schon die „Backbones“, die Hauptleitungen der Fern-Kommunikationsnetze stellt. Weit abgeschlagen finden sich derzeit die einzigen Rivalen: Mikrowellensender und Satelliten übermitteln nur ein Hunderttausendstel der Bandbreite. Täglich verlegen Techniker neue Kabel über Strecken, die dem dreifachen Erdumfang gleichkommen. Sollten die Fortschritte in dieser Technologie allerdings ihr bisheriges Tempo beibehalten, wird die Trägerkapazität in einer einzigen Glasfaser in etwa zehn Jahren „nur“ einige hundert Billionen Bit pro Sekunde erreichen.

Doch es besteht Grund zur Hoffnung, nicht zuletzt für Analysten: Für die Photonik fließt Risikokapital immer üppiger. In den ersten neun Monaten des Jahres 2000 waren allein in den USA 3,4 Milliarden Dollar für optische Netze ausgegeben worden, verglichen mit 1,5 Milliarden im ganzen Jahr 1999. Solche Investitionen verleihen der Branche Flügel: Die Übertragungskosten für ein Bit Information halbieren sich mittlerweile alle neun Monate. Mag das auch ein Äpfel-Birnen-Vergleich sein: Die Kosten für integrierte Schaltkreise benötigen dazu 18 Monate.

Glasfasern hielten 1977 ihren Einzug in amerikanische, kommerzielle Kommunikationsnetze, als Minicomputer Stand der Technik waren und Personal Computer noch in den Kinderschuhen steckten. Eine solche Leitung besteht aus einem Glas- oder Plastikkern, der von einer „Cladding“ genannten Schicht umhüllt wird. Beide unterscheiden sich im Brechungsindex (ein Maß für die Licht ablenkenden Eigenschaften eines Materials) derart, dass im Kern reisende Lichtwellen an der Grenzschicht zum Cladding reflektiert werden; nur an den Faserenden können sie ein- beziehungsweise austreten. Um Daten durch eine solche Faser zu schicken, müssen sie zunächst in Lichtsignale verwandelt werden. Das erledigt ein Laser oder eine Leuchtdiode, die einen Infrarot-Lichtstrahl mit 1,2 bis 1,6 Mikrometern (tausendstel Millimetern) Wellenlänge in die Faser einspeisen.

Ein solches Signal kann heutzutage etwa 80 Kilometer weit reisen, dann wird eine Auffrischung erforderlich, denn trotz aller Raffinessen bei der Faserherstellung lassen sich geringe Energieverluste nicht vermeiden. Anfangs wurden die Lichtwellen dazu in elektrische Signale umgewandelt, diese dann elektronisch verstärkt und wieder optisch eingespeist. Zu Beginn der neunziger Jahre kam Ersatz: spezielle Glasfaserabschnitte, die mit Ionen des Metalls Erbium aus der Gruppe der seltenen Erden dotiert sind. Wird eine solche *erbium doped fiber* mit einem Pump-Laser bestrahlt, verstärken die Ionen das gedämpfte Signal durch stimulierte Emission. Damit entfällt hier die optoelektronische Signalumwandlung. Darüber hinaus lassen sich auf diese Weise viele verschiedene Sendekanäle beziehungsweise unterschiedliche Wellenlängen gleichzeitig verstärken.



BERND AUERS

Dieses Glasfaserkabel (gelb) kanalisiert einen Datenstrom von 40 Milliarden Bit pro Sekunde. Konstruiert wurde die ganze Anlage in der von Nayel Shafei (Bild) vor kurzem gegründeten Firma Enkido.

Datenstau im elektronischen Flaschenhals

Das ermöglichte, sie so eng wie möglich zu legen; diese Technik wird als *dense wavelength division multiplexing*, kurz DWDM, bezeichnet. Die Durchsatzkapazität einer Glasfaser vergrößerte sich um die Anzahl der Kanäle, wobei jeder einzelne mit der gleichen oder einer größeren Informationsmenge beladen wird wie in herkömmlichen optischen Netzwerken. Heute übertragen die Fasern etwa 160 Frequenzen simultan, woraus sich eine Bandbreite von insgesamt 400 Gigabit pro Sekunde ergibt. Fast jeder Telekom-Netzbetreiber setzt mittlerweile DWDM ein, um die Kapazität seiner unterirdisch verlegten Leitungen zu steigern. Die Aufrüstung der Systeme kostet nur die Hälfte einer Neuverlegung und dauert nur einen Bruchteil der Zeit.

Ein Kommunikationsnetz besteht aber selten aus direkten Verbindungen, vielmehr benötigt der Datenfluss Vermittlungsknoten, die Bit für Bit an ihren Bestimmungsort steuern. Hier gelang es noch nicht, von einer elektronischen Zwischenstufe wegzukommen, und hier befindet sich der eigentliche Flaschenhals derzeitiger Glasfasernetze. Prozessoren und Speicherchips in Vermittlungsknoten haben heute schon mit dem massiven Datendurchsatz der neuesten Netze – etwa 10 Milliarden Bit pro Sekunde – enorme Probleme. Um mithalten zu können, müssen die elektronischen Komponenten aufgerüstet werden, und das kostet.

Dementsprechend arbeiten Wissenschaftler in Unternehmen und Forschungsinstituten weltweit daran, Licht mit Licht zu schalten. Die Photonik hat derzeit etwa das Stadium der Elektronik vor 30 Jahren erreicht.

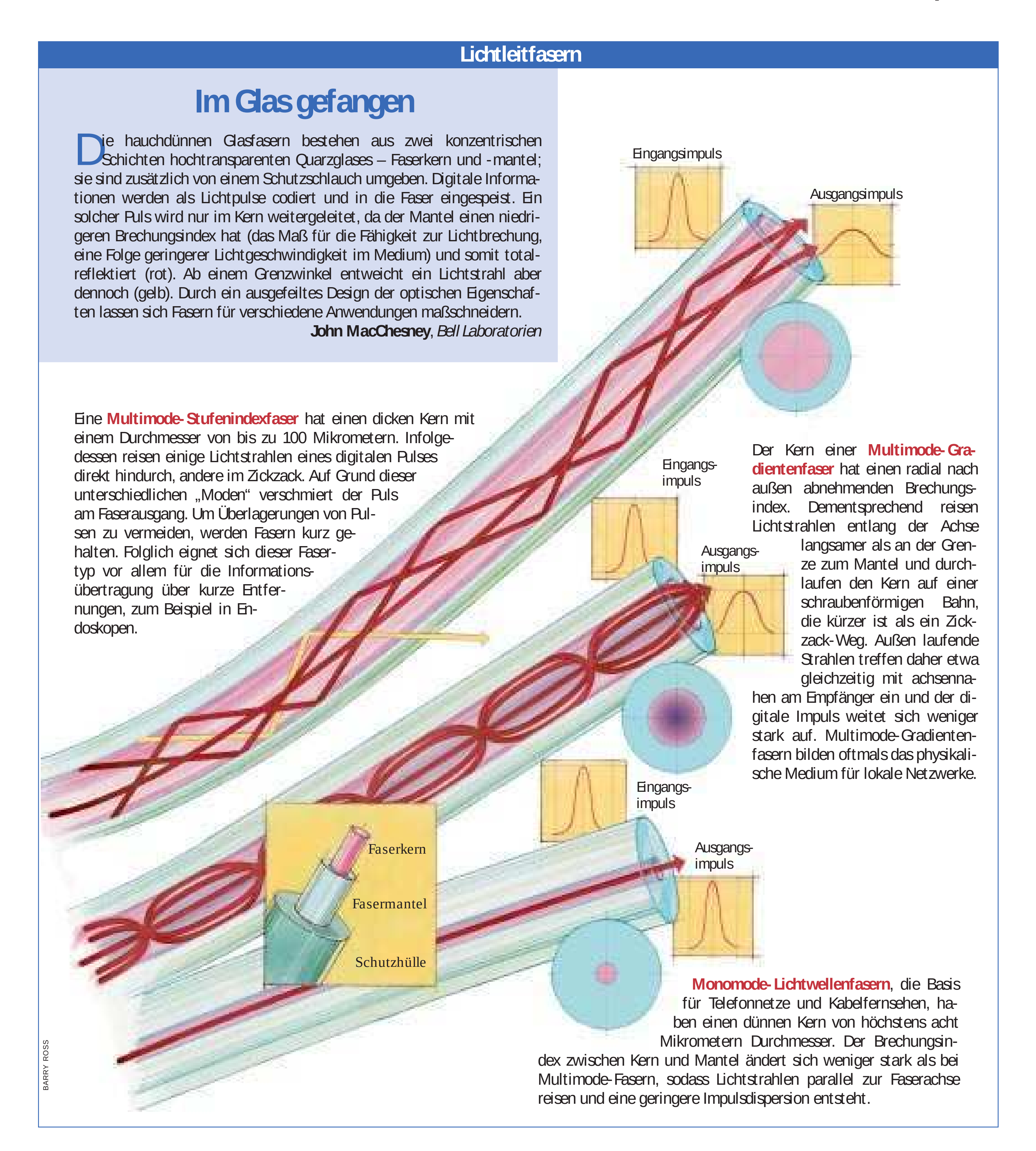
Optische Schalter müssen im Endeffekt dasselbe leisten wie ein elektronischer Vermittler, im Fachjargon *Router* genannt: Sie müssen die Zieladresse eines Datenpakets und andere wichtige Informationen lesen können, um es weiterzuleiten (Datenströme im Internet werden dem Internet Protokoll, kurz IP, gemäß in Pakete aufgeteilt, die unabhängig voneinander im Netz reisen und am Bestimmungsort wieder zusammengesetzt werden). Rein photonischen Prozessoren gelang das bisher nur in Laborumgebungen. Die heute schon erhältlichen optischen Schalter basieren auf einer hybriden Technik: Zwar wird das eigentliche Signal nicht elektrisch vermittelt, aber das Lesen der Adresse und die entspre- ▶

Lichtleitfasern

Im Glas gefangen

Die hauchdünnen Glasfasern bestehen aus zwei konzentrischen Schichten hochtransparenten Quarzglases – Faserkern und -mantel; sie sind zusätzlich von einem Schutzschlauch umgeben. Digitale Informationen werden als Lichtpulse codiert und in die Faser eingespeist. Ein solcher Puls wird nur im Kern weitergeleitet, da der Mantel einen niedrigeren Brechungsindex hat (das Maß für die Fähigkeit zur Lichtbrechung, eine Folge geringerer Lichtgeschwindigkeit im Medium) und somit totalreflektiert (rot). Ab einem Grenzwinkel entweicht ein Lichtstrahl aber dennoch (gelb). Durch ein ausgefeiltes Design der optischen Eigenschaften lassen sich Fasern für verschiedene Anwendungen maßschneidern.

John MacChesney, *Bell Laboratorien*



Eine **Multimode-Stufenindexfaser** hat einen dicken Kern mit einem Durchmesser von bis zu 100 Mikrometern. Infolgedessen reisen einige Lichtstrahlen eines digitalen Pulses direkt hindurch, andere im Zickzack. Auf Grund dieser unterschiedlichen „Moden" verschmiert der Puls am Faserausgang. Um Überlagerungen von Pulsen zu vermeiden, werden Fasern kurz gehalten. Folglich eignet sich dieser Fasertyp vor allem für die Informationsübertragung über kurze Entfernungen, zum Beispiel in Endoskopen.

Der Kern einer **Multimode-Gradientenfaser** hat einen radial nach außen abnehmenden Brechungsindex. Dementsprechend reisen Lichtstrahlen entlang der Achse langsamer als an der Grenze zum Mantel und durchlaufen den Kern auf einer schraubenförmigen Bahn, die kürzer ist als ein Zickzack-Weg. Außen laufende Strahlen treffen daher etwa gleichzeitig mit achsennahen am Empfänger ein und der digitale Impuls weitet sich weniger stark auf. Multimode-Gradientenfasern bilden oftmals das physikalische Medium für lokale Netzwerke.

Monomode-Lichtwellenfasern, die Basis für Telefonnetze und Kabelfernsehen, haben einen dünnen Kern von höchstens acht Mikrometern Durchmesser. Der Brechungsindex zwischen Kern und Mantel ändert sich weniger stark als bei Multimode-Fasern, sodass Lichtstrahlen parallel zur Faserachse reisen und eine geringere Impulsdispersion entsteht.

chende Steuerung des Schalters erfolgt elektronisch.

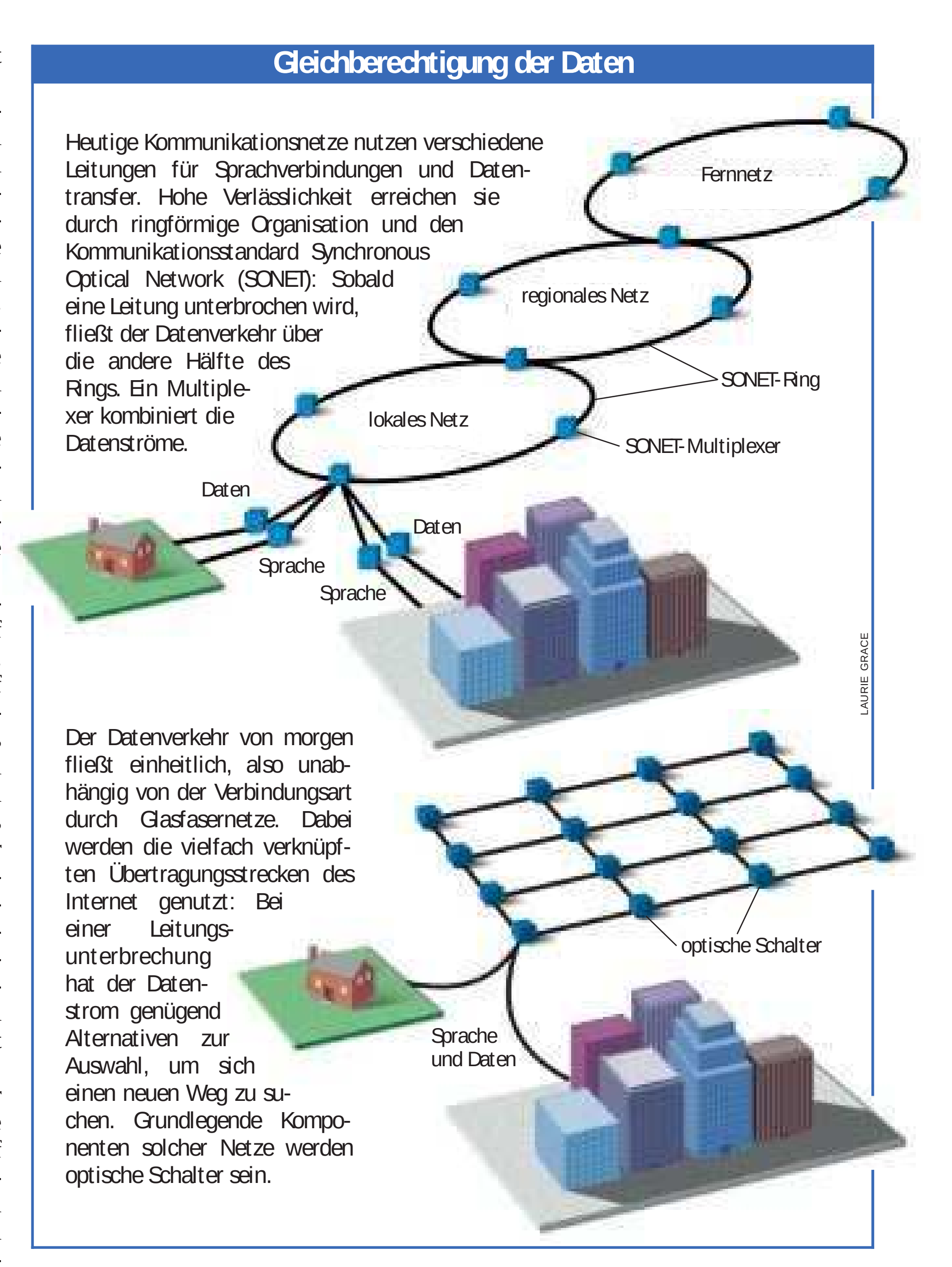
Auch wenn die rein optische Vermittlung von Datenpaketen in den großen Netzen Realität werden sollte, sind im Übergangsbereich zu den lokalen Telefonnetzen und den eigentlichen Sende- und Empfangsstellen Router nötig, die Datenpakete lesen und steuern. Dazu kommt das Problem der „letzen Meile“, also der Verbindung von schnellen Leitungen zu Wohnungen und Büros. Einige amerikanische Bauunternehmer bieten an, neue Gebäudekomplexe schon entsprechend verkabelt zu errichten. Die Kosten allerdings verderben das Privatvergnügen. Bis vor kurzem waren hoch entwickelte optische Netzwerk-Komponenten wie DWDM selbst für regionale Telefonnetze noch zu teuer.

Zulieferfirmen für Netzwerkkomponenten schielen außerdem neidisch auf die Elektronikindustrie, der es gelingt, alle Komponenten ihrer Schaltungen auf winzigen Chips zu integrieren. Methoden zum Bau kombinierter Module aus Lasern, Glasfasern, Filtern und Gittern (die zum Auftrennen der Wellenlängen dienen) sind hochbegehrt. Anders als Elektronen lassen sich Lichtwellen aber nicht einfach in Kondensatoren speichern oder mittels anderer Wellen steuern. Darüber hinaus liegt die Wellenlänge des Laserlichts für Glasfasern wie erwähnt im Infrarotbereich, das setzt Grenzen für die Miniaturisierung, die von elektronischen Schaltkreisen vor gut zehn Jahren überschritten worden ist.

Immerhin ist die Entwicklung der Technik keine Frage des Geldes: Die Photonik genießt einen ebensolchen Ruf als Zukunftsmarkt wie die Biotechnologie. Selbst für die verrücktesten Ideen gibt es Unterstützung, und sei es nur, um sich eine Option zu sichern, später Patente oder Experten einzukaufen. Gesetzt also den Fall, die Forscher lösten alle erwähnten Probleme und es entstünde ein durchgehend optisches Netzwerk. Zahlreiche Datenprotokolle würden dann obsolet, zum Beispiel der Kommunikationsstandard SONET (*synchronous optical networks*), der die elektronische Umwandlung der Informationen an den derzeitigen Vermittlungsstellen steuert. Vielmehr wird das Internet-Protokoll den Datenverkehr durchgängig beherrschen, gleich ob Sprache, Video und Computerdaten auf den Leitungen reisen. Ein Telefonat am Muttertag nach Hause würde als IP-Paket verschickt, das Telefonnetz entwickelte sich zu einem großen LAN (*local area network*). Um es zu nutzen, genügte eine Ethernet-Karte für Computer, Telefon oder Fernseher.

Gleichberechtigung der Daten

Heutige Kommunikationsnetze nutzen verschiedene Leitungen für Sprachverbindungen und Datentransfer. Hohe Verlässlichkeit erreichen sie durch ringförmige Organisation und den Kommunikationsstandard Synchronous Optical Network (SONET): Sobald eine Leitung unterbrochen wird, fließt der Datenverkehr über die andere Hälfte des Rings. Ein Multiplexer kombiniert die Datenströme.



Der Datenverkehr von morgen fließt einheitlich, also unabhängig von der Verbindungsart durch Glasfasernetze. Dabei werden die vielfach verknüpften Übertragungsstrecken des Internet genutzt: Bei einer Leitungsunterbrechung hat der Datenstrom genügend Alternativen zur Auswahl, um sich einen neuen Weg zu suchen. Grundlegende Komponenten solcher Netze werden optische Schalter sein.

Bleibt nur die Frage: Was macht wer mit den schier unendlichen Bandbreiten? Nach Schätzungen von Lucent Technologies werden sie im Jahre 2010 ausreichen, um jedem Menschen, ob Mann, Frau oder Kind, ob in Sri Lanka oder San José, einen Netzzugang mit 100 Megabit pro Sekunde anzubieten. Das reicht für fünfzig Videoverbindungen oder mehrere hochauflösende Fernsehprogramme (*high definition television*, HDTV). Schöne neue Welt?

Allen Prophezeiungen über Verdopplungen im Datenverkehr via Internet in Abständen von wenigen Monaten zum Trotz zweifeln nicht wenige Beobachter daran, dass die Nachfrage so grenzenlos sein wird wie angenommen. Die Consultant-Firma Adventis aus Boston rechnet damit, dass sich im Jahre 2004 nur 15 bis 20 Prozent aller privaten Internetnutzer einen Breitbandzugang zum Netz leisten werden, und zwar über Kabel-Modems – also über das Fernsehkabelnetz – oder DLS (*digital subscriber line*) – einem Anschluss via Telefonkabel, wie ihn die Telekom in Deutschland anbietet. Darüber hinaus würden rein organisatorische Maßnahmen wie das Vorhalten von Webseiten auf bestimmten Servern die Belastung des Netzes ohnehin reduzieren. Das Unternehmen schätzt deshalb, dass etwa vierzig Prozent der Glasfaserkapazitäten in den USA ungenutzt bleiben, in Europa sogar fast 65 Prozent. Die Folge wäre ein Preisverfall, der die Märkte dann wieder antriebe. Diese Annahme eines Überangebots von Bandbreiten ist allerdings nicht sehr weit verbreitet.

Dennoch werden Terabit- und Petabit-Netzwerke erst dann einen Durchbruch erzielen, wenn sich neue Möglichkeiten zu ihrer Verwendung auftun. So wie das World Wide Web ursprünglich eine Hilfestellung für Teilchenphysiker sein sollte, ihre Ergebnisse unter Fachkollegen zu veröffentlichen, könnte sich auch hier eine neue Nutzung an der Peripherie des Geschehens ergeben und nicht aus den Werbemaßnahmen großer Medienkonzerne, virtuelle Realität und Videos durch die Netze zu schicken. Vinod Khosla, Risikokapital-Geber bei Kleiner Perkins Caufield & Byers, setzt auf das so genannte Metacomputing: Rechner auf der ganzen Welt könnten in Kooperation umfangreiche Aufgaben bewältigen, etwa Daten aus Radioteleskopen nach außerirdischem Leben durchmustern oder die aerodynamischen Eigenschaften eines Jumbo Jets mit tausend Passagieren simulieren. Das wäre zumindest ein Beispiel dafür, was mit einem Datennetz anzustellen wäre, das im Takt von Quadrillionen Bit pro Sekunde pulsiert. ■

Gary Stix *ist Redakteur für Sonderprojekte von Scientific American.*

OPTISCHE SCHALTER

Spieglein, Spieglein auf dem Chip

Datennetze mit Übertragungsraten von Billiarden Bit pro Sekunde sind möglich – sofern man alle elektronischen Schalter durch rein optische ersetzt.

Von David C. Bishop, C. Randy Giles und Saswato R. Das

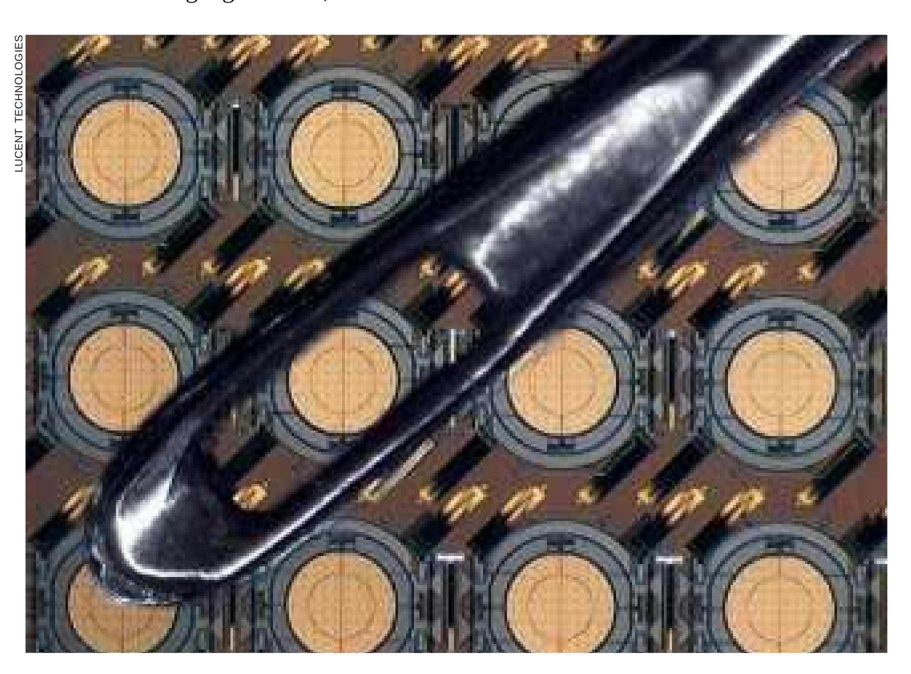
Während der Blütezeit des Eisenbahnbaus im Amerika des 19. Jahrhunderts war der Bedarf an neuen Schienennetzen so groß, dass die Gesellschaften Fahrgäste schon beförderten, bevor eine Verbindung zwischen zwei Städten fertig gestellt war: Häufig baute man Brücken über größere Flüsse erst zum Schluss, und die Passagiere mussten vom Zug auf eine Fähre wechseln, damit übersetzen und einen neuen Zug besteigen. Ähnlich liegen die Dinge derzeit im Bereich optischer Netzwerke. Den Fähren entsprechen elektronische Schalter, die den Datenverkehr an den Verzweigungen im Glasfasergeflecht weitervermitteln. Sprachübertragungen, Videosignale und Computerdaten müssen sozusagen von der Datenautobahn herunterfahren und über eine langsamere, da elektrische Landstraße zur nächsten schnellen Verbindung gelangen.

Die Probleme mit der opto-elektrooptischen Umwandlung werden zunehmend dadurch verschärft, dass der Leistungszuwachs bei Systemen der so genannten Photonik den rein elektronischer Schaltungen bald überholen wird. Für die wird es immer schwieriger, die Datenflut, die via Glasfasern eintrifft, zu bewältigen. Die nächste Generation von Kommunikationsnetzen soll deshalb mit optischen Schaltern arbeiten.

Netzknoten für einzelne Wellenlängen, englisch *cross connectors* genannt, leiten eintreffende Signale zu einer der möglichen Ausgangsfasern. Ein Schalter mit hundert Eingangskanälen, von denen jeder zehn Gigabit transportiert, muss dann mit einem Terabit (eine Billion Bit) pro Sekunde zu Rande kommen.

Einige Firmen setzen dazu auf so genannte mikroelektromechanische Systeme (MEMS): Kleine, mechanisch verstellbare Spiegel lenken das Licht von einer Eingangslichtleitfaser auf eine von vielen Ausgangsfasern. Mikromaschinen finden mehr und mehr industrielle Anwendungen etwa in der Telekommunikation, der Automobilindustrie, in der Luftfahrt und Unterhaltungselektronik. Es sind integrierte Schaltungen mit mechanischen Komponenten auf dem Chip, hergestellt aus Silizium-Einkristallen, den Wafern, mittels der in der Mikroelektronik üblichen Prozesse. Bei der MEMS-Fertigung werden lichtempfindliche Schichten auf dem Silizium über Masken belichtet, die exponierten Stellen entwickelt und nun frei liegende Oxidschichten weggeätzt, sodass die strukturellen Bestandteile der Mikromechanik wie in einem Halbrelief stehen bleiben. Auf diese Weise entstehen mechanische Komponenten mit Abmessungen von einigen Mikrometern, die sich elektronisch gesteuert bewegen.

Dank dieser bewährten Fertigungstechnik sind MEMS preisgünstig, sie lassen sich mit hochkomplexen elektronischen integrierten Schaltkreisen kombinieren, und Mikromaschinen aus solchen Komponenten erweisen sich als sehr haltbar. Ein MEMS-Schalter im optischen Netzwerk besteht vor allem aus winzigen Spiegeln, die so positioniert sind, dass für jede eintreffende Wellenlänge aus dem informationstragenden Lichtstrom einer Glasfaser genau einer dieser Mikrospiegel bereitsteht. Bei einem der vielen mittlerweile existierenden Modelle können sie so-


LUCENT TECHNOLOGIES

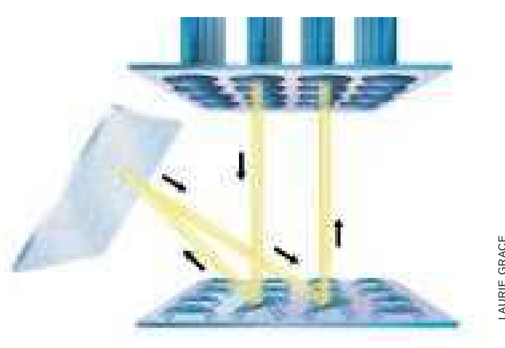
Mikrospiegel, so klein wie die Öse einer Nähnadel, reflektieren Lichtwellen von einer Glasfaser zur anderen.

Spiegelschalter „MEMS“

Diese Schaltervariante besteht aus einem mikroelektromechanischen System (MEMS), das mittels kippbarer Spiegel (links eine Nahaufnahme) Lichtsignale aus einer Glasfaser über einen Reflektor in eine andere Faser weiterleitet.



LUCENT TECHNOLOGIES



LAURIE GRACE

wohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen gekippt werden, um so jede beliebige Wellenlänge aus einer von 256 Eingangsfasern auf eine von ebenso vielen Ausgangsfasern umzulenken. In einem MEMS-Schalter trifft Licht einer bestimmten Wellenlänge, das beispielsweise durch Port A kommt, auf einen Mikrospiegel, der ihn etwa zu Port C weiterleitet.

Welcher Zugang es sein soll, entscheidet die Software im signalverarbeitenden Prozessor des Schalters. Der steuert dann eine Elektrode auf der Oberfläche des Chips an, um den richtigen Spiegel über ein elektrisches Feld in die richtige Winkelstellung zu bringen. Der eintreffende Lichtstrom wird auf diese Weise in separate Wellenlängen aufgetrennt und zu den Output-Spiegeln reflektiert, die diese dann in die entsprechende Ausgangsfaser speisen (siehe Grafik oben).

Die Schaltspiegel messen nur etwa einen halben Millimeter im Durchmesser, das entspricht ungefähr einem Stecknadelkopf. Sie stehen im Abstand von einem Millimeter, sodass alle 256 Spiegel auf ein 2,5 Quadratzentimeter großes Siliziumstückchen passen. Der ganze Schaltknoten kann noch mit einer Hand gehalten werden und verbraucht ungefähr hundertmal weniger Strom als Schalter mit optoelektronischer Umwandlung. Die Fertigungskosten sind dank der Verwendung herkömmlicher Technologien zur Produktion von Siliziumschaltkreisen gering.

Da jeweils ein Spiegel den Input, ein anderer den Output steuert, muss sich jeder in alle Richtungen kippen lassen. Glücklicherweise erhalten die Spiegel bei der Herstellung eine solche Steifigkeit, dass sie nur selten ihre korrekte Ausrichtung verlieren. Die Fertigungssteuerung selbst erlaubt es zudem, jede Komponente für sich präzise zu manipulieren. Damit rücken Schalter für höhere Kapazität immer näher. Bei den früher entworfenen Lithiumniobat-Schaltern war die Zahl der nötigen Schaltelemente ungleich größer, nämlich genau gleich der Quadratzahl der Ein- oder Ausgänge des Netzknotens – ab einer gewissen Größe lassen sich solche Systeme nicht mehr realisieren.

Datenspiegeleien

Betreibern von Kommunikationsnetzen kommt es sehr entgegen, dass sich mit den Spiegelarrays bei steigender Nachfrage die Schaltergröße variieren lässt. Der erste große MEMS-Vermittlungsknoten, der Lucent Lambda-Router, ist seit Juli 2000 erhältlich. Seine Durchsatzkapazität liegt bei 10 Terabit pro Sekunde, der zehnfachen Rate der meistgenutzten Internetverbindungen. In jedem der 256 Input-Output-Kanäle ist eine Datengeschwindigkeit von 320 Gigabit pro Sekunde möglich – 128-mal schneller als bei herkömmlichen elektronischen Schaltern. Goldene Zeiten: Im kalifornischen Silicon-Valley entstanden mehr als 10 auf MEMS spezialisierte Jungunternehmen.

Andere hingegen setzen auf photonische Wellenleiter statt Mikrospiegel, und das ist ebenfalls ein viel versprechender Ansatz. Wellenleiter bestehen wie Glasfasern aus zwei transparenten Medien, einem Kern und einer „Cladding“ genannten Hülle. Beide haben verschiedene Brechungsindizes, sodass das Licht nur an den Enden der Leiter ein- und austreten kann. Solche Strukturen lassen sich ebenfalls mit herkömmlichen Techniken der Halbleiterindustrie aus Silizium fertigen. Ein gegenwärtig von den Firmen JDS Uniphase, Nanovation, Lucent und anderen erprobter *cross connector* auf Wellenleiterbasis macht sich thermoelektrische Wirkungen zu Nutze, um die Signale zwischen Glasfasern hin- und herzuschalten. Das einlaufende Signal wird auf zwei Leitungswege geleitet und einer davon durch einen elektrischen Widerstand leicht erwärmt, mithin etwas verlängert. Das ändert die Phase des Lichts (also den genauen zeitlichen Ablauf ihrer Schwingung) am Ende des entsprechenden Wellenleiters. Bei einem erneuten Zusammentreffen der Signale beider Wellenleiter kann dieser Phasenunterschied die Steuerung zu einem von zwei möglichen Output-Ports bewirken.

Solche integrierten Wellenleiter sind preisgünstig, klein und in großen Mengen herstellbar. Auf den Silizium-Wafern lassen sich auch Laser und Lichtdetektoren befestigen, die für Empfang beziehungsweise Versenden optischer Impulse als Informationsträger vonnöten sind. Das Ziel ist der integrierte photonische Schaltkreis, der alle diese Komponenten in einem Silizium-Chip enthält.

Eine verblüffende Variante verbindet solche Wellenleiter mit der Tintenstrahl-Technik, die in Druckern verwendet wird. Anfangs sehr skeptisch beurteilt, findet diese Entwicklung von Agilent, einem Ableger von Hewlett-Packard, mehr und mehr Anhänger.

Ein *bubble switch* besteht aus einem Gitter von Siliziumdioxid-Wellenleitern. Winzige Löcher an den Kreuzungen sind entweder leer oder von einer Flüssigkeitsblase ausgefüllt, deren Brechungsindex dem des Halbleitermaterials entspricht. Die von den Lichtwellenleitern an der Kreuzung eingeschlossenen Winkel sind so gewählt, dass ein Lichtstrahl durch ein leeres Loch geradlinig in den nächsten Leiter hindurchstrahlt, von einer Blase aber gebrochen und umgelenkt wird. Der Druckkopf eines Tintenstrahldruckers dient dazu, diese Blasen einzubringen oder abzusaugen (siehe Bild auf Seite 86).

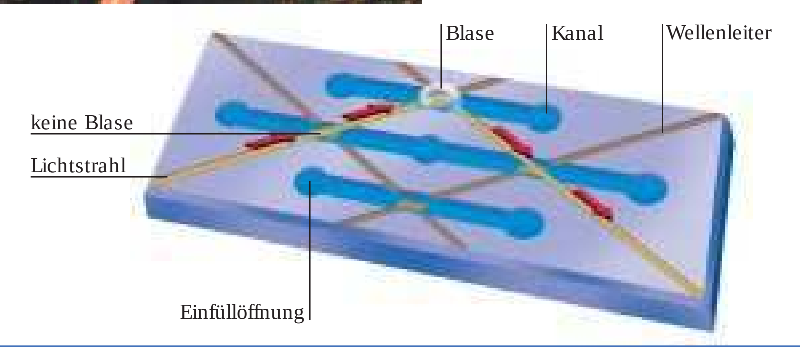
Solche „Blasenschalter“ verbinden kleine Ausmaße und akzeptable Schaltgeschwindigkeit mit einer guten optischen Leistung. Doch auch sie lassen sich nicht ohne weiteres auf hohe Kapazitäten bringen. Bei zehn Eingängen und zehn Ausgängen müssten schon 100 Druckköpfe die Vermittlung übernehmen, diese Technik eignet sich also wohl eher für kleine Verbindungsknoten.

Ein weiterer Schaltertyp macht sich die opto-elektronischen Eigenschaften von Flüssigkristallen zu Nutze; dasselbe Prinzip bringt auch flache Computerbildschirme zum Leuchten (Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 117). Flüssig- ▶

Schaltervariante „Bubble Switch“



Eine winzige Blase an der Kreuzung zweier Lichtleiter lenkt einen Strahl im rechten Winkel ab (Grafik und Fotografie). Sie wurde mit einem „Druckkopf“ aufgeblasen, der Technik eines Tintenstrahldruckers vergleichbar. Ohne eine solche Blase würde der Strahl die Kreuzung ungehindert passieren. Kleine Kanälchen leiten die Flüssigkeit zu den Kreuzungspunkten, der Tintenstrahlkopf bläst sie dort zu den Blasen auf.



kristalle bestehen aus Molekülen mit einer charakteristischen länglichen Form. Sie wechselwirken mit elektromagnetischen Feldern und richten sich im Raum aus. Dadurch vermögen sie die Polarisationsrichtung von Lichtwellen, das heißt ihre Schwingungsebene zu drehen. Wie beim *liquid crystal display* (LCD) wird auch beim optischen Schalter eine Flüssigkristallschicht zwischen zwei Glasplatten eingebracht, die mit einer transparenten und leitfähigen Oxidschicht überzogen sind; sie dienen als Elektroden. Eine angelegte Spannung schafft das elektrische Feld, das die räumliche Ausrichtung der Moleküle des Flüssigkristalls und damit die Polarisationsrichtung des Lichts steuert, das durch eine solche Zelle fällt. Ein *displacer* genannter Kristall leitet Licht dagegen je nach Polarisation zu einer bestimmten Outputfaser weiter: Aufgrund seines heterogenen Aufbaus können zum Beispiel horizontal schwingende Wellen einfach passieren, während vertikal polarisierte wie in einem Prisma gebrochen werden.

Anfangs waren solche Schalter sehr langsam und reagierten zu empfindlich auf kleinste Änderungen der Ausgangspolarisation. Verbesserungen erlauben Unternehmen wie Corning oder Chorum Technologies heute, intensiv an der Weiterentwicklung dieses Schaltertyps zu arbeiten. Auch hier treten technische Probleme vor allem beim Versuch auf, große Kapazitäten zu erreichen, da die Anzahl der geforderten Schaltelemente proportional zum Quadrat der Eingangs- oder Ausgangsfasern zunimmt. Eine andere mögliche Anwendung dieser Technik bieten so genannte rekonfigurierbare Multiplexer: Geräte, die Wellenlängen in ein Netzwerk speisen oder ausschließen.

Achtung: Nichtlineare Optik

Die bislang genannten Schaltprinzipien sind verhältnismäßig langsam (Schaltzeiten um 1 ms) und bewegen sich in der auch aus dem Alltag bekannten linearen Optik: Je mehr Licht auf einen Spiegel fällt, desto heller erscheint das darin sichtbare Abbild. Im Bereich der nichtlinearen Optik, das heißt bei hinreichend hohen Feldstärken des elektromagnetischen Feldes der Lichtwelle, verhalten sich Werkstoffe je nach Lichtintensität unterschiedlich, ändern beispielsweise ihren Brechungsindex. Der große Vorteil dieser Effekte: Sie stellen sich um ein Millionenfaches schneller ein als etwa bei Erwärmung eines Wellenleiters. Das ermöglicht ultraschnelle Schalter, die zwischen zwei Bits eines Datensignals umschalten können, das mit 320 Gigabit pro Sekunde daherkommt.

Auch lichtleitende Glasfasern legen ein nichtlineares Verhalten an den Tag. Ultraschnelle Verbindungselemente, die innerhalb von quadrillionstel Sekunden (Femtosekunden) schalten können, lassen sich mit einem *nonlinear optical loop mirror* (NOLM) realisieren, einem Interferometer, in dem zwei Lichtstrahlen in Wechselwirkung treten.

Dieser besondere Spiegel besitzt an zentraler Stelle einen Faserkoppler, der den eintreffenden Lichtstrahl auf zwei Schenkel einer Faserschleife aufteilt. Erste Möglichkeit: Beide Signale reisen in Gegenrichtung hindurch, vereinigen sich nach einer Runde wieder und verlassen das Schaltelement durch die gleiche Faser, durch die sie gekommen waren. Bei der zweiten Möglichkeit aber wird nach der Aufteilung ein weiterer Impuls in einen Schenkel eingespeist. Die so verstärkte Lichtintensität ändert den Brechungsindex der Glasfaser, wodurch sich die Phase der dort reisenden Welle verschiebt. Das vereinigte Signal verlässt dann den Schalter über eine andere Ausgangsfaser.

Im Allgemeinen erfordern nichtlineare optische Schalter energiereiche Lichtimpulse von sehr kurzer Dauer. Verwendet man dagegen Halbleiterlaser, die durch eine Entspiegelung am Eingang und Ausgang am Lasern gehindert werden – das sind dann optische Verstärker (englisch *semiconductor optical amplifier*, SOA) – , so lässt sich die Energieschwelle für nichtlineare Effekte senken (vergleiche auch „Lichtschalter für Glasfasernetze“, Spektrum der Wissenschaft 2/2001, S. 76). Derartige Schalter sind noch nicht marktreif, gelten aber als große Hoffnung für die Zukunft, denn sie lassen sich als integrierte Photonische Schaltkreise (*photonic integrated circuit*) bauen, dem optischen Gegenstück zum Mikrochip. Darin senden Laser ihr Licht durch eingebaute Wellenleiter in interferometrischen Anordnungen mit integrierten SOAs. ■

Literaturhinweise

Optical Fiber Telecommunications IIIB. Von Ivan P. Kaminow und Thomas L. Koch (Hrsg.), Academic Press, 1997.

Understanding Fiber Optics. Von Jeff Hecht, Prentice Hall, 1998.

Bell Labs Technical Journal. Band 5, Nr. 1, Januar bis März 2000. Abrufbar unter www.lucent.com/minds/techjournal.

Photonik. Von Jürgen Jahns. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2001.

David C. Bishop *ist Direktor der Abteilung für mikromechanische Forschung der Bell Laboratories,* **C. Randy Giles** *technischer Manager in deren Forschungsgruppe für photonische Subsysteme. Beide waren an der Entwicklung des MEMS-Schalters von Lucent Technologies beteiligt. Der Wissenschafts- und Technikjournalist* **Saswato R. Das** *arbeitet als Sprecher der Bell Laboratories.*

Optische Router

Etikettiermaschine für das Internet

Vermittlungsknoten in Netzwerken, die so genannten Router, schalten einlaufende Signale weiter, ob es sich dabei um Sprache, Videos oder Datenpakete handelt. Künftig werden diese Informationsqualitäten nur durch „Aufkleber“, fachlich „Labels“, unterscheidbar als Datenpakete reisen, wie es bereits im Internet durch das Internet-Protokoll (IP) geregelt wird. Beispielsweise wird eine E-Mail in viele kleine Päckchen zerlegt. Man kann sich ein solches Datenpaket wie einen Briefumschlag vorstellen, auf dessen Vorderseite die Adresse steht (der Kopf, englisch *header*) und in dessen Innerem die eigentliche Nachricht steckt beziehungsweise die Nutzfracht (englisch *payload*).

Auf der Reise zwischen Sender und Empfänger durch Glasfasern passieren die Datenpakete diverse Router, die für jedes Paket nach Maßgabe der Verfügbarkeit und Auslastung der abgehenden Datenleitungen entscheiden, auf welchem Weg es weiterreist. Derzeit werden die einlaufenden optischen Daten in elektrische Signale umgewandelt, elektronisch ausgewertet und auf die richtige Spur gebracht.

Sind beispielsweise Glasfaserstrecken überlastet, müssen die Router Umleitungen ausfindig machen und das Netz längerfristig umkonfigurieren; dazu reichen langsamere optische Schalter, wie sie im vorigen Beitrag beschrieben wurden.

Um Päckchen gleichen Ziels schneller zu befördern, bietet sich auf der Protokollebene neben anderen das „All-Optical Label Swapping“, kurz AOLS, an. Dieses fügt ein weiteres optisches Adressetikett (englisch *label*) bei, um Pakete mit gleicher Adresse zu bündeln, so wie ein Postsack Briefe zur nächsten großen Verteilstation sammelt. Und wie Mitarbeiter der Post nur das Schild auf diesem Sack lesen müssen und nicht die Adressen der einzelnen Briefe, wird ein optischer Router nur das kurze Label und nicht den ganzen *header* nutzen, um die Ausgangsfaser oder –wellenlänge festzulegen, auf der das Paket weiterreisen soll.

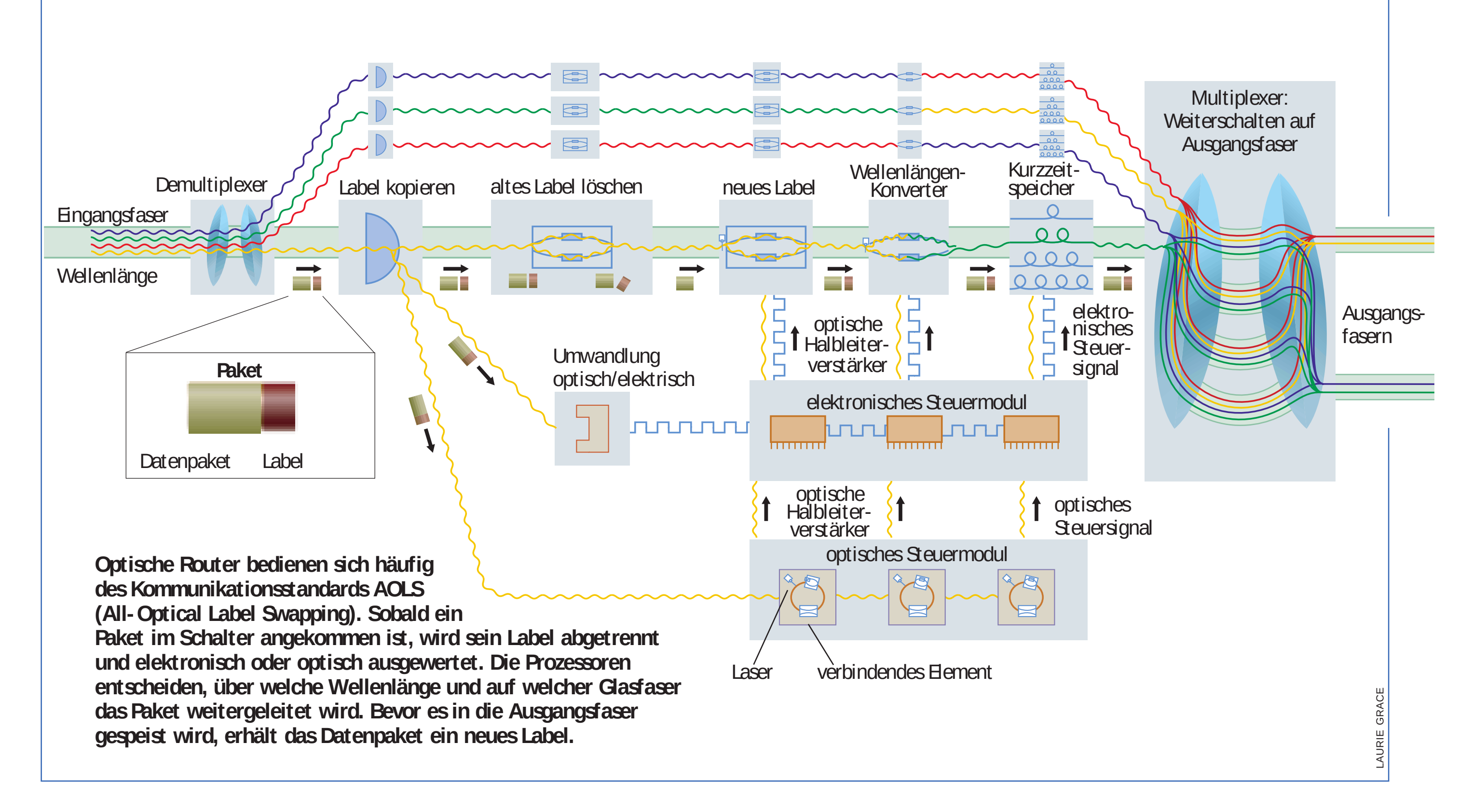
Entsprechende rein optische Schaltkreise sind derzeit kaum praxistauglich oder für den Serieneinsatz noch ungeeignet. Um einen optischen Router zu konstruieren, benötigt ein Ingenieur beispielsweise Logikschaltungen, die Etiketten auf einer Licht-kontrolliert-Licht-Basis verarbeiten. Wenn ein Datenpaket einen AOLS-Router der ersten Generation erreicht, wird deshalb eine elektronische Kopie des Labels erzeugt und dann herkömmlich ausgewertet (siehe Grafik). Die optoelektronische Umwandlung des nur etwa 20 Bit großen Adressetiketts geht immerhin deutlich schneller vonstatten als die kompletter Datenpakete.

Neben der Auswahl einer Faser als Übertragungsweg muss ein Router auch die Wellenlänge festlegen, unter Umständen eine Wellenlängenkonversion initiieren, um Schaltkonflikte zu verhindern: Kommen zwei Datenpakete gleicher Farbe aus verschiedenen Fasern gleichzeitig an und sollen auf dieselbe Wellenlänge einer Ausgangsfaser umgeschaltet werden, dann muss eines der Pakete auf eine andere Farbe dieser Faser umgeleitet werden.

Schließlich wäre es wünschenswert, auch das kleine Adresslabel des Datenpakets rein optisch auszuwerten, statt den Umweg über die Elektrik zu gehen. Im Labor gelang es bereits, mit ultraschnellen optischen Logikschaltungen sehr einfache Entscheidungen über die Paketsteuerung zu treffen, sie ließen sich aber noch nicht ausreichend kombinieren, um den Anforderungen einer komplexen Schaltungsvermittlung gerecht zu werden.

Daniel J. Blumenthal

Der Autor lehrt Elektrotechnik an der Universität Kalifornien.



Optische Router bedienen sich häufig des Kommunikationsstandards AOLS (All-Optical Label Swapping). Sobald ein Paket im Schalter angekommen ist, wird sein Label abgetrennt und elektronisch oder optisch ausgewertet. Die Prozessoren entscheiden, über welche Wellenlänge und auf welcher Glasfaser das Paket weitergeleitet wird. Bevor es in die Ausgangsfaser gespeist wird, erhält das Datenpaket ein neues Label.

WERKSTOFFE

„Glasfasern“ aus Kunststoff

Optische Leiter müssen nicht aus Glas sein. Andere Werkstoffe lassen sich einfacher verarbeiten, haben aber ihre Grenzen.

Von Ulrich Eberl

Optische Leiter bestehen meist aus extrem dünnen, aber recht teuren Glasfasern. Doch es gibt schon preiswertere Konkurrenz: Für Strecken von wenigen Metern nutzt man auch Kunststoff-Leitungen, und für Entfernungen bis zu 500 Metern wurde vor kurzem eine mit Kunststoff ummantelte Glasfaser entwickelt (*polymer cladded fiber*, PCF).

Ein herkömmlicher „Lichtwellenleiter“ (LWL) besteht aus Mantel und Kern von jeweils hochreinem Quarzglas, das Licht kaum absorbiert und somit ein Signal nur wenig schwächt (siehe Kasten auf Seite 81). Dotieren, also Zugeben von Fremdstoffen wie Germaniumdioxid oder Bortrioxid, stellt die jeweilige Brechzahl ein. So genannte Monomode-Fasern mit Durchmessern von weniger als zehn Mikrometern (tausendstel Millimetern) sind am besten für die Übermittlung extrem hoher Datenraten über große Entfernungen geeignet. Der derzeitige, von Siemens-Ingenieuren gehaltene Weltrekord liegt bei sieben Terabit (7×10^{12} Bit) pro Sekunde über 50 Kilometer – das entspräche 100 Millionen gleichzeitig geführter Telefongespräche.

Lichtwellenleiter aus Kunststoff-Kern und -Mantel kommen bei wenigen hundert Megabit (Millionen Bit) pro Sekunde bescheidener daher, sind aber wesentlich billiger und flexibler in der Handhabung. Sie lassen sich nahezu beliebig biegen, schneiden, wieder zusammenfügen und mit Steckern versehen. Allerdings dämpft der Kunststoff ein Signal ungleich stärker als Quarzglas, so dass Konstrukteure diese Alternative nur für Entfernungen von maximal zwei Metern verwenden, was beispielsweise im Automobil vollkommen ausreicht.

Sprinter für die Kurzstrecke

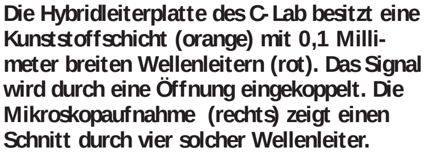
Die PCF-Faser bietet einen Kompromiss: Der Kern besteht aus Glas (Durchmesser 200 Mikrometer), der Mantel aus Kunststoff (30 Mikrometer). Sie dämpft das Licht zwar stärker als eine Quarzglasfaser, aber etwa 18-mal weniger als ein Kunststoff-Lichtwellenleiter – eine PCF-Faser eignet sich deshalb für Übertragungsstrecken bis zu 500 Metern, wie man sie etwa in Industrieanlagen vorfindet. Wird, wie allgemein üblich, das Licht einer Leuchtdiode bei 660 Nanometer verwendet (bei Glas-LWL braucht man hingegen die teureren Infrarotlaser), so lassen sich etwa 500 Megabit pro Sekunde über ein 100 Meter langes PCF-Kabel übertragen.

In Produktionsanlagen konkurriert dieser Werkstoff deshalb mit dem herkömmlichen Leiter aus Glas, denn er ist leichter zu handhaben: Auf Grund ihrer dünnen Kerne erfordern Glasfasern präzise aufgesetzte Stecker und exakt beschliffene Stirnflächen, damit Licht optimal ein- und ausgekoppelt werden kann. Eine solche Genauigkeit gelingt nur maschinell in der Fabrik. Glasfasern werden deshalb unter Angaben der Längen und der benötigten Stecker vom Kunden bestellt und fertig konfektioniert ausgeliefert. Stimmen die Vorgaben nicht oder werden Kabel beim Verlegen geknickt oder anders beschädigt, muss Ersatz geordert werden. Bei PCF-Leitungen ist ein derartiger Aufwand nicht nötig. Sie werden auf Kabeltrommeln geliefert und lassen sich auf der Baustelle mit einfachen Werkzeugen fast so leicht konfektionieren wie Kunststoff-Leiter.

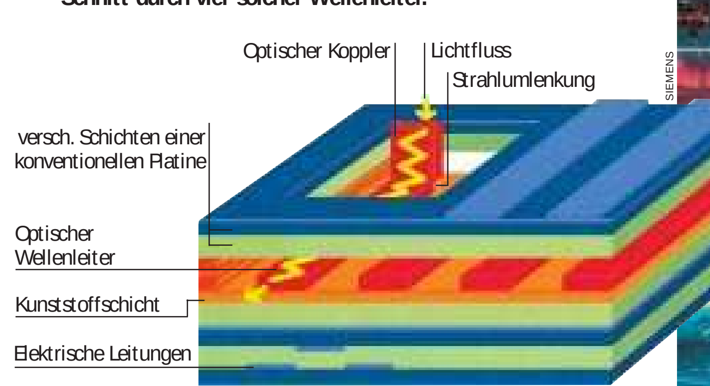
Die Übertragung hoher Datenraten gelingt auch auf kürzeste Distanzen mit Wellenleitern, die als Strukturen in den Leiterplatten der Elektronik erzeugt werden. Solche Kanäle aus transparenten Kunststoffen sollen den Datentransfer auf den Leiterplatten, beispielsweise zwischen einem Mikroprozessor und seinen Speicherbausteinen, beschleunigen.

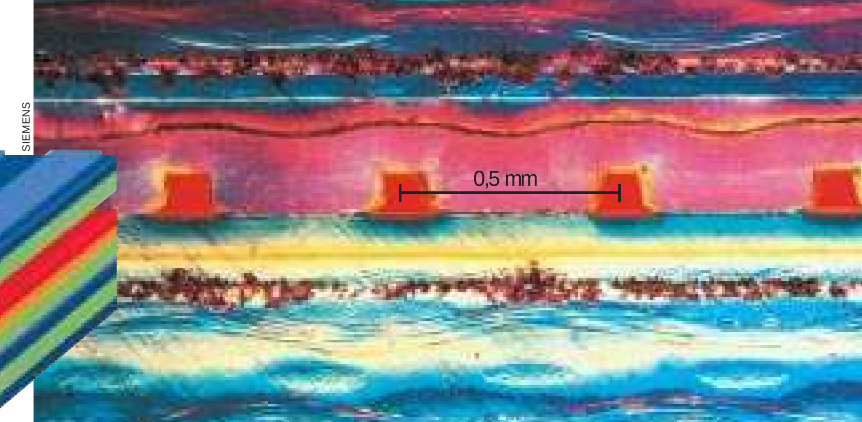
Derartige optische Wellenleiter entwickelt beispielsweise der Paderborner „Think-Tank“ C-Lab. Sie sind derzeit 0,1 Millimeter dick und haben einen 0,05 Millimeter dünnen Mantel. Ein Problem ist, die erforderlichen photonischen Bauteile wie Laserdioden zur Wandlung von elektrischen in optische Signale auf den Leiterplatten auf 0,01 Millimeter genau zu positionieren. Das gelingt vor allem durch konstruktive Tricks wie selbstjustierende Stecker. Das C-Lab-System vermag bereits drei Gigabit pro Sekunde über eine Leiterplatte zu jagen, das sind 20-mal mehr, als es elektrische Leitungen ermöglichen. ■

Ulrich Eberl *arbeitet als Wissenschaftsjournalist in München.*



Die Hybridleiterplatte des C-Lab besitzt eine Kunststoffschicht (orange) mit 0,1 Millimeter breiten Wellenleitern (rot). Das Signal wird durch eine Öffnung eingekoppelt. Die Mikroskopaufnahme (rechts) zeigt einen Schnitt durch vier solcher Wellenleiter.

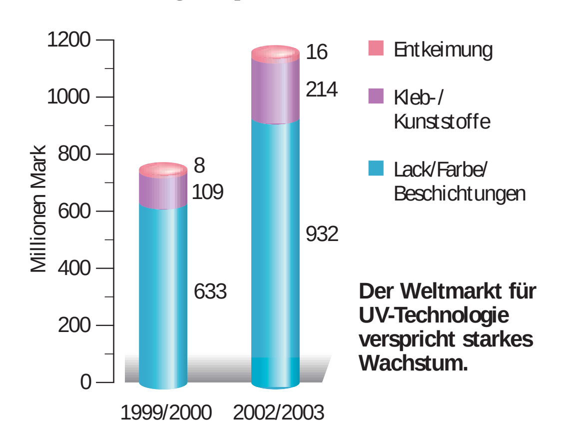




Dr. Hönle AG

Kunststoff unter der Höhensonne

Ultraviolettes Licht wird in der Industrie vielfach genutzt, insbesondere bei der Trocknung und Härtung spezieller Farben, Lacke, Kleb- und Kunststoffe. Einer der weltweit führenden Anbieter entsprechender Anlagen ist die Dr. Hönle AG in Martinsried bei München. Das seit Januar 2001 am Neuen Markt notierte Unternehmen startete 1976 mit UV-Geräten für den medizinischen Bereich. Heutige Systeme kommen in der Fertigung von Smartcards, Chips, elektronischen Bauelementen, Pkw-Streuscheiben, CDs und DVDs ebenso zum Einsatz wie in der Druckindustrie oder bei der Entkeimung von Verpackungen in der Kosmetik-, Lebensmittel- und Pharmabranche. UV-Gasentladungslampen basieren auf einem einfachen Prinzip: Ein elektrisches Feld regt die Elektronen der Gasfüllung an, höhere Energiezustände einzunehmen; wenn sie dann auf ihr Ausgangsniveau zurückfallen, setzen sie die aufgenommene Energie als Licht frei.



Der Weltmarkt für UV-Technologie verspricht starkes Wachstum.

UV-Strahler für die DVD-Fertigung

BILDER DIESER SEITE: DR. HÖNLE AG

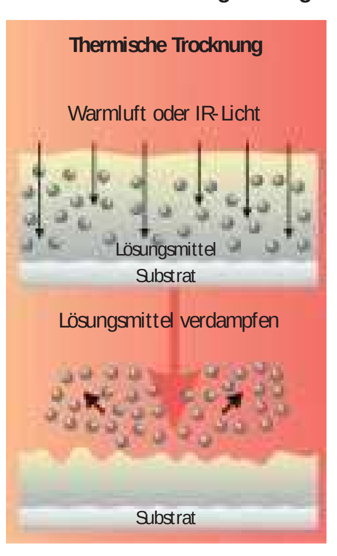
In der DVD-Fertigung beispielsweise werden je zwei Polykarbonat-Scheiben unter UV-Strahlung zusammengeklebt. Die auftreffende Energiemenge setzt eine photochemische Reaktion in Gang: Einem zunächst flüssigen Kunststoffkleber zugefügte Photoinitiatoren absorbieren die Energie des Lichts und werden dadurch in freie Radikale gespalten. Diese wiederum leiten die Bildung von Polymerketten aus den monomeren Grundbausteinen des Klebers ein. In Sekundenbruchteilen ist dieser vollständig ausgehärtet, und die DVD lässt sich weiterverarbeiten.

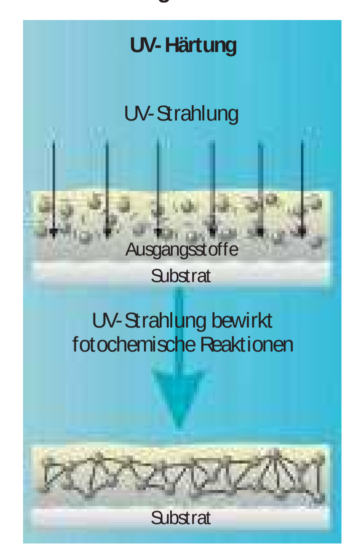
Die Klebstoffe haben spezifische Absorptionsspektren, die von den Photoinitiatoren bestimmt werden. Die Argon-gefüllte Gasentladungslampe der UV-Anlage ist mit Quecksilber und gegebenenfalls mit Eisenjodid oder Gallium dotiert, sodass sie entsprechend kurz- oder längerwelligere Strahlung emittiert.

Bei der Gasentladung wird maximal ein Drittel der eingesetzten elektrischen Leistung in UV-Licht umgewandelt, der große Rest hingegen als Wärme, also Infrarot-Strahlung abgegeben. Sollen hitzeempfindliche Bauteile verklebt werden, müssen zusätzliche Vorrichtungen deshalb den Infrarot-Anteil abführen. Dazu dienen beispielsweise Spiegel, die für diesen Wellenlängenbereich durchlässig sind.

Die UV-Strahlung beschleunigt nicht nur Trocknungs- und Härtungsprozesse gegenüber konkurrierenden thermischen Verfahren, die auf Warmluft, Infrarotlicht (IR) oder Near-Infra-Red (NIR) beruhen. Die Klebstoffe benötigen auch keine umweltschädlichen Lösungsmittel, die beim thermischen Trocknen aufwendig aufgefangen werden müssen. Darüber hinaus sind UV-getrocknete Oberflächen wie der Schutzlack einer CD unempfindlicher gegen chemische und mechanische Einflüsse als herkömmlich getrocknete. Dementsprechend erwartet die Dr. Hönle AG ein weltweites Jahreswachstum der UV-Technik von 15 bis 20 Prozent in diesem Marktsegment.

Thermische Trocknung im Vergleich zu UV-Härtung





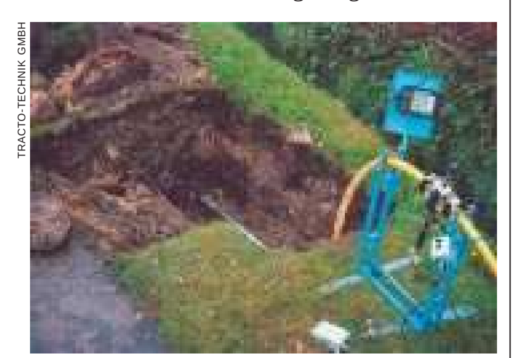
Tracto-Technik GmbH

Stählerne Maulwürfe

Offene Straßengräben sind Autofahrern und Anwohnern ein Dorn im Auge. Das Verlegen von Rohren und Kabeln in dieser offenen Bauweise ist aufwendig, destruktiv und mitunter auch gar nicht möglich. Als Alternative bieten sich druckluftbetriebene Erdraketen an, die ohne Bohrgestänge und -spülung arbeiten. Diese stählernen Maulwürfe ergraben unterirdisch bis zu siebzig Meter lange Tunnel und verlegen dabei Leitungen aller Art. Die Raffinesse liegt in der Steuerung des Bohrkopfes entlang einer Kurve, beispielsweise unter einem Haus hindurch und um einen Abwasserkanal herum. Seit über zwei Jahren produziert und vertreibt das Unternehmen Tracto-Technik GmbH in Lennestadt im Sauerland eine solche Erdrakete mit Namen „Grundosteer“. Nach der Erkundung des Baugrundes wird sie mittels einer Lafette ausgerichtet.

Sobald Druckluft einströmt und die Maschine Bodenkontakt hat, gräbt sie sich mit einer Geschwindigkeit von etwa zehn Metern pro Stunde durch das Erdreich. Ein Peilsender im vorderen Maschinengehäuse meldet kontinuierlich die Position. Bei einer Abweichung oder zur gewollten Richtungsänderung dreht der „Steuermann“ per Lenkknüppel ein am Druckluftschlauch befestigtes Spannsystem, damit den torsionssteifen Schlauch – ein innenliegendes Stützkorsett stabilisiert ihn – und so letztlich den Meißelkopf. Am Ziel angelangt, tritt die Erdrakete oberirdisch oder in einer Grube aus. Der Einzug des Rohres oder Kabels erfolgt beim Zurückziehen des Schlauches aus dem Tunnel.

Tracto-Technik produziert und vertreibt bereits seit 1972 weltweit ungesteuerte Erdraketen. Gegenwärtig exportiert das Unternehmen in über fünfzig Länder und beschäftigt insgesamt mehr


TRACTO-TECHNIK GMBH

Per Joystick wird die Erdrakete gesteuert.

als 500 Mitarbeiter, davon 19 in der Forschung. Prototypen werden auf unternehmenseigenem Testgelände sowie auf Baustellen der Kunden erprobt. Die Firma arbeitet mit mehreren Hochschulen zusammen, beispielsweise mit der FH Oldenburg, der FH Karlsruhe und der FH Wiesbaden. Mit letzterer wurde eine Kalkulationssoftware entwickelt, die anfallende Baukosten für ein Projekt exakt berechnet. Gemeinsam mit der Universität Siegen erarbeitete Tracto-Technik zudem das Ausbildungsprogramm „Grabenloses Bauen“, das angehende Bauingenieure seit dem Wintersemester 1999 dort als Wahlpflichtfach belegen können.

Beide Beiträge von **Ulrike Zechbauer**. *Die Autorin arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in München.*

Links zu den Unternehmen finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

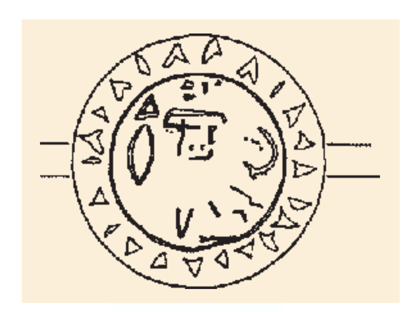
ARCHÄOLOGIE

Mythos Troia

Die Wanderausstellung „Troia – Traum und Wirklichkeit" reflektiert den Mythos der antiken Königsstadt durch die Jahrhunderte und stellt die neuesten Forschungsergebnisse eines internationalen Wissenschaftlerteams vor.

Von Matthias Mochner

Die Entdeckung eines konvexen Bronzesiegels 1995 in Troia erwies sich für Archäologen und Historiker als Sensation. Denn das unscheinbare Objekt mit einem Durchmesser von nur zwei Zentimetern trägt luwische Hieroglyphen, also Zeichen derjenigen Schrift, die im riesigen Reich der Hethiter (etwa 1570–1200 v. Chr.) neben der Keilschrift weit verbreitet war. In der mehr als hundertjährigen Geschichte der Troia-Archäologie war dies das erste schriftliche Zeugnis, das die Ausgräber zu Tage förderten.





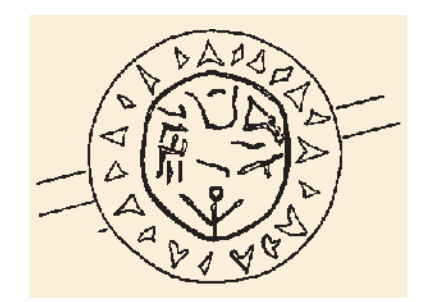
FOTOS: KATALOG

Das 1995 in Troia gefundene luwisch beschriftete Siegel: Nach dem archäologischen Befund gehört das Bronzesiegel in die Zeit nach dem Erlöschen des Hethiterreichs. Es ist konvex und zweiseitig beschrieben. Die Vorderseite (oben) trägt den Namen einer Frau, die Rückseite (rechts) den eines Schreibmeisters.

Das auf Ende des 12. Jh. v. Chr. (Troia VIIb) datierte Siegel wirft zahlreiche Fragen auf. Vor allem: Ist es ein Indiz für politische, soziale und wirtschaftliche Kontakte zwischen der Troas – dem Gebiet um Troia – und den Großkönigen der Hethiter? Wenn ja, wie sahen diese Beziehungen aus?

Der modernen Troia-Forschung geht es in erster Linie darum, die Kultur der einstigen Königsstadt in ihren vielfältigen Beziehungen zu den angrenzenden Staaten der Hethiter, des Balkangebietes, aber auch des östlichen Mittelmeerraumes zu erforschen. Die immensen Erkenntnisse, die bei den neuen Grabungskampagnen seit 1988 über die Troas gewonnen werden konnten, stehen den Entdeckungen Heinrich Schliemanns aus dem letzten Drittel des 19. Jahrhunderts dabei in nichts nach.

Im Gegenteil: Die Arbeiten des internationalen Projekts unter der Leitung von Manfred Korfmann von der Universität Tübingen in und um Troia ergeben eine immer differenziertere Sicht auf den antiken Ort. Dem über viele Jahrhunderte lang gültigen romantischen Traum aus den Schriften Homers erwächst mit der Fülle der neuen Fakten eine komplexe Wirklichkeit. So sind auf dem durch die Grabungen von Schliemann berühmt gewordenen Hisarlik-Hügel heute beispielsweise insgesamt zehn Siedlungsperioden chronologisch zu unterscheiden (Troia I–X) – Untergliederungen noch nicht einmal mitgezählt (allein für Troia I wurden 14 Bauphasen festgestellt).





Auch die im Jahr 1988 aufgefundene Außensiedlung des 17. bis 13. Jh. v. Chr. (Troia VI/VIIa), deren Bebauung zunächst aus Holzhäusern, später dann aus hohen Steingebäuden bestand, lässt erkennen, dass die Stadt schon im 2. Jahrtausend v. Chr. weitaus größer war als bisher angenommen. Rund 270 000 Quadratmeter muss das Siedlungsgebiet in jener Zeit umfasst haben. Troia I/II – also die so genannte Maritime Troia-Kultur (etwa 3000 –2200 v. Chr.) – schätzen die Archäologen inklusive der Unterstadt auf rund 90 000 Quadratmeter. Heute besteht kein Zweifel mehr daran, dass die Stadt über viele Jahrhunderte hinweg ein Wirtschafts-, Handels-, Produktions- und Verkehrszentrum von überregionaler Bedeutung war.

Lässt sich auch der von Homer überlieferte Troianische Krieg historisch nachweisen? Korfmann gibt sich diesbezüglich optimistisch, wenn er die Übereinstimmungen der Grabungsergebnisse mit den entsprechenden Beschreibungen in Homers „Ilias" als „überraschend" charakterisiert. Mit den Ergebnissen der letzten Jahre dürfte zumindest eine Basis dafür geschaffen sein, um der Lösung dieser Frage einen Schritt näher zu kommen.

Wichtiger aber für die moderne Archäologie ist die Frage nach der Einbindung Troias in den anatolischen Kulturkreis. Noch bis vor kurzem galt die Königsstadt als „griechisch". Der Engländer John Davis Hawkins und der Deutsche Frank Starke konnten 1996 unabhängig voneinander nachweisen, dass der Ort Wilusa, der in zahlreichen hethitischen Staatsdokumenten belegt ist, mit Homers Ort Ilios (im Griechischen ursprünglich Wilios genannt) identisch ist. Seitdem erscheinen die Reste der einstigen Bebauung des heute noch 15 Meter hohen Hisarlik an der Meerenge in völlig neuem Licht.

Zahlreiche weitere Ergebnisse der neuesten Grabungen – etwa die Datierung einer im Jahre 1997 untersuchten heiligen Quellhöhle im Bereich der ehemaligen Unterstadt – führen fast zwingend zu dem Schluss, dass Troia um 2200–1700 v. Chr. (Troia IV/V) als

eine Kultur von Anatolien – genauer: als Vasallenstaat der Hethiter – verstanden werden muss. Die über Jahre hin gültige Sicht einer Zugehörigkeit der Troas zum griechischen Kulturkreis erfährt damit eine wesentliche Erweiterung (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 66).

Selbst mit Ägypten könnten die Troianer Beziehungen gepflegt haben. Darauf weist ein 1998 in Troia gefundener Keulenkopf aus hellgrüner bis weißer Fayence hin, der wohl aus der Zeit von 2300–2200 v. Chr. stammt. Immerhin war Fayence als Werkstoff im Land der Pharaonen häufiger anzutreffen als anderswo. Das besagte Stück könnte die Zeremonialwaffe einer bedeutenden Persönlichkeit gewesen sein.

Matthias Mochner *arbeitet als freier Journalist und Museumsführer in Berlin.*

Wie sich Architektur und Bebauung der von Schliemann und seinen beiden Nachfolgern Wilhelm Dörpfeld und Carl Blegen in den Jahren 1893/94 beziehungsweise 1932/38 untersuchten Akropolis von Troia über die Zeitläufte veränderten, dies kann man inzwischen anhand dreidimensionaler Computermodelle, die den aktuellen Wissensstand widerspiegeln, fast lückenlos nachvollziehen. Die Ausstellung „Troia – Traum und Wirklichkeit“ gibt hierzu reichlich Gelegenheit.

Die Faszination von Troia, das seit Dezember 1998 als Weltkulturerbe unter dem Schutz der Unesco steht, währt seit über 3000 Jahren. Nicht nur die Römer, sondern auch fast alle europäischen Länder des Mittelalters suchten ihre Anfänge durch eine bis auf Troia und seine Helden zurückreichende fiktive Genealogie zu legitimieren. Die Ausstellung mit ihren rund 600 Exponaten widmet sich auch diesem Aspekt der legendenumwobenen Stadt. ■

Die Ausstellung „Troia – Traum und Wirklichkeit“ ist noch bis 17. Juni im Forum der Landesbank Baden-Württemberg in Stuttgart zu sehen. Geöffnet montags 14–18 Uhr, dienstags und mittwochs 10–18 Uhr, donnerstags bis sonntags 10–21 Uhr. Weitere Stationen: Braunschweigisches Landesmuseum und Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig (14.7.–14.10.2001) sowie Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland Bonn (16.11.2001–17.2.2002).

EPIDEMIEN

Droht eine Rückkehr der Tierseuchen?

Wie ehedem grassieren auch heute immer wieder Seuchen in der Nutztierhaltung. Doch in unserer Zeit sind nicht die Erreger das eigentliche Problem, sondern ihre leichte Verbreitung durch Handel und Verkehr.

Von Thomas C. Mettenleiter und Matthias Kramer

Maul- und Klauenseuche, BSE, Schweinepest, Geflügelpest, Tuberkulose bei Rindern: Die Medien sind voll von Schreckensmeldungen. Kehren etwa die Seuchen zurück? Droht uns gar ein Horrorszenario wie im Mittelalter, mit Pocken, Pest und anderen Plagen?

Dabei war doch erst kürzlich die weltweite Ausrottung der Pocken, einer der Geißeln der Menschheit, gefeiert worden! Warum geraten Infektionskrankheiten, insbesondere solche, die bei landwirtschaftlichen Nutztieren auftreten, plötzlich wieder in das Blickfeld der Öffentlichkeit, wo es doch so lange recht ruhig um sie war? Ist es nur wegen der emotional aufputschenden Bilder der Massentötung von Tieren, die publikumswirksam über die Mattscheibe flimmern? Weil Tierkörper jetzt „unschädlich beseitigt“, anstatt von uns verzehrt zu werden?

Um die gegenwärtige Situation und die eigentlichen Hintergründe verstehen zu können, müssen wir uns die Entwicklung der Tierseuchen in den letzten Jahren in Deutschland, Europa und weltweit genauer ansehen.

Zunächst einmal: Eine Tierkrankheit wird dann als Seuche bezeichnet, wenn sie durch ein infektiöses Agens (etwa ein Virus oder Bakterium) verursacht wird, auf natürlichem Wege mittelbar oder unmittelbar übertragen werden kann und zu einer bestimmten Zeit und in einem bestimmten Gebiet vermehrt auftritt. Weltweit fasst das Internationale Tierseuchenamt (OIE, *Office international des epizooties*) die gefährlichsten Tierseuchen in einer so genannten „Liste A“ zusammen.

Viele dieser Krankheiten kamen in Deutschland noch nie oder seit Jahrzehnten nicht mehr vor. In manchen Staaten wird jedoch nicht jeder Ausbruch umfassend gemeldet. Insbesondere in den Entwicklungsländern gibt es sicherlich erhebliche Dunkelziffern.

In Deutschland traten einheimische Tierseuchen noch Anfang der neunziger Jahre relativ oft auf. Viele dieser Infektionskrankheiten konnten aber in den letzten Jahren durch Impfkampagnen oder andere konsequente Gegenmaßnahmen drastisch zurückgedrängt werden. Dazu zählen die Tollwut, die Schweinepest, die Newcastle-Krankheit (atypische Geflügelpest), die Aujeszkysche Krankheit (Juckseuche oder Pseudowut, mit Lähmungen und meist tödlichem Ausgang) und die Rinderleukose (eine infektiöse Leukämie). Andere Tierseuchen hingegen ließen sich bisher nicht sichtlich eindämmen wie etwa die bösartige Faulbrut der Bienen, die Psittakose der Papageienvögel oder auch die Salmonellose der Rinder.

Für die menschliche Gesundheit hatten hier zu Lande in den letzten Jahrhunderten vor allem auch einige bakterielle Tierseuchen eine erhebliche Bedeutung. An Tuberkulose und Brucellose (einer fiebrigen Infektion) bei Nutzvieh werden sich viele Ältere noch erinnern. Heute sind diese Krankheiten in Deutschland praktisch getilgt. Vereinzelt treten sie aber immer wieder auf, wie gerade durch die Tuberkulosefälle bei Rindern in Bayern deutlich wurde. Ursachen für diese „Neuausbrüche“ sind meist der Zukauf infizierter Tiere aus dem Ausland unter Missachtung geltender Vorschriften (im Falle von Brucellose) oder Infektionen, die vom Menschen ausgehen (bei Tuberkulose). Hier hat sich also die Situation umgekehrt: Nicht das Tier infiziert den Menschen, sondern der Mensch das Tier!

Trotzdem entstehen aus diesen Einzelausbrüchen keine Epidemien. Das verhindern die regelmäßigen Kontrollen der ▶

Maul- und Klauenseuche

Eine Panikimpfung würde das Problem nur verdecken

Eine Impfung gegen die akut drohende Maul- und Klauenseuche erscheint derzeit wenig sinnvoll – und das aus einer Reihe von Gründen:

Bis geimpfte Tiere eine Immunität gegen das Virus aufbauen, vergehen je nach Tierart einige Tage bis zu zwei oder gar drei Wochen. Selbst dann noch können Wiederkäuer zu Virusträgern werden und möglicherweise andere Tiere anstecken, obwohl sie selbst nicht erkranken. Weil zur Zeit noch keine verlässlichen Tests verfügbar sind, um geimpfte von tatsächlich infizierten Tieren zu unterscheiden, könnte das Virus unerkannt unter der Impfdecke zirkulieren.

Ohnehin gibt es nirgendwo die Kapazitäten, um die nötigen Impfstoffmengen für alle Klauentierpopulationen in der Europäischen Union bereitzustellen. Ringimpfungen lediglich um den primären Infektionsherd können dann sinnvoll sein, wenn das Virus nicht bereits durch Tiertransporte oder auf andere Weise weit verbreitet wurde. Als die Seuche in Großbritannien erkannt wurde, war es dafür bereits zu spät. Gleiches gilt für Sperrgürtel.

Bis 1991 wurden die Tierbestände in Deutschland flächendeckend gegen Maul- und Klauenseuche geimpft. Zusammen mit anderen strikten Maßnahmen gelang es damals in Westeuropa, die hier endemischen Typen der Erreger auszumerzen. Gegen das jetzt festgestellte Virus hätten die alten Impfstoffe vermutlich nicht geholfen. Denn der gegenwärtig grassierende Erregerstamm wurde wahrscheinlich aus dem asiatischen Raum eingeschleppt und unterscheidet sich deutlich von den früheren Typen. Die Impfstoffbanken der Europäischen Union und einiger Länder halten zwar eine Vakzine auf der Basis eines „ähnlichen" Stammes in beschränkter Menge vorrätig. Doch wie gut der im akuten Fall wirken würde, ist sehr ungewiss.

Der Impfstoff gegen die Maul- und Klauenseuche ist eine Totvakzine, besteht also aus inaktivierten Viren. Das hat aber zur Folge, dass die Immunität sich erst nach einiger Zeit aufbaut und nicht allzu lange anhält. Zudem können sich geimpfte Tiere dennoch mit dem Erreger infizieren und ihn weitergeben. Um die Vakzine herzustellen, muss man zunächst mit hochvirulenten Viren arbeiten, wovon für flächendeckende Impfungen große Mengen benötigt würden. Trotz aller technisch möglichen Sicherheitsvorkehrungen besteht jederzeit ein Risiko, dass der Erreger irgendwie entwischt. Dies geschah beispielsweise 1988 beim Ausbruch der Maul- und Klauenseuche in Deutschland. Auch in der Europäischen Union insgesamt waren zwischen 1977 und 1987 knapp 40 Prozent der Ausbrüche „hausgemacht" – auch einer der Gründe, warum die Impfungen vor zehn Jahren in Deutschland eingestellt wurden.

Wie viele meiner Kollegen befürworte ich einen Rückfall in die Impfzeit nicht. Wie sonst aber wäre Ausbrüchen der Maul- und Klauenseuche am besten zu begegnen? Die Keulung – in der Tierseuchenbekämpfung keineswegs eine „antiquierte Praxis", wie viele behaupten – hilft, wenn Infektketten schnell unterbrochen werden müssen. Britische Epidemiologen meinen, dass in Großbritannien zwischen dem Erkennen der Symptome und der Tötung zu viel Zeit verstrich. Deswegen wurde das Land der Epidemie so lange nicht Herr.

Der akute Ausbruch der Maul- und Klauenseuche wird hoffentlich die Entwicklung von markierten Impfstoffen vorantreiben. Denn bei anderen Tierseuchen hat sich die Strategie „gesunde Tiere mit markierter Vakzine impfen, infizierte Tiere töten" bewährt.

Primär sollten aber unbedingt die massiven Risiken in unserer Gesellschaft für Infektionen im Veterinärbereich ausgeräumt werden: nämlich Tiertransporte über weite Distanzen, willkürliches Zusammenbringen von Tieren aus verschiedenen Regionen oder gar Ländern, Viehhandel ohne ausreichende Dokumentation. Außerdem müssen Landwirte die Hygiene wieder ernster nehmen. Wirklich „archaisch" ist die Unsitte, den Tieren unerhitzte Speiseabfälle zu verfüttern. Dies ist längst verboten, wird aber noch oft praktiziert.

Wieder mehr Respekt vor Seuchen, der bis in die persönliche Beweglichkeit hineindringt, wäre heilsam.



***Thomas C. Mettenleiter** ist Präsident der Bundesforschungsanstalt für Viruskrankheiten der Tiere.*

Tiere in den Beständen und am Schlachthof sowie die Fleischuntersuchungen nach dem Schlachten. Europaweit herrschen dabei einheitliche Verhütungs- und Bekämpfungsvorschriften.

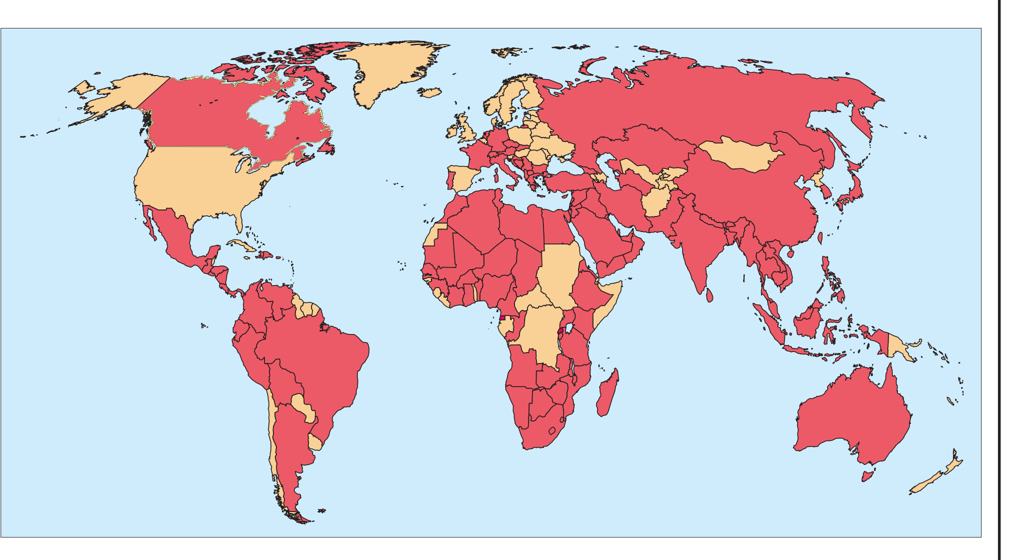
Für die Europäische Union ist die Situation vielfältiger als in Deutschland, schon weil sie Gebiete unterschiedlichster Klimata umfasst, von mediterran bis arktisch. Und sie grenzt an Länder, in denen zahlreiche Tierseuchen endemisch vorkommen, also in Haustierbeständen permanent vorhanden sind. Dabei besteht immer das Risiko, dass diese Krankheiten in Nachbarländer verschleppt werden.

Vielfalt der Erregertypen

Die Maul- und Klauenseuche zum Beispiel trat in den letzten Jahren in Mittel- und Südosteuropa mit verschiedenen Typen des Erregers wiederholt auf. So meldete im Jahre 1994 Griechenland 95 Ausbrüche vom Typ 0, zwei Jahre später erneut 39 Ausbrüche dieses Typs und schließlich im vergangenen Jahr 14 Ausbrüche vom Typ ASIA 1. Die meisten Fälle betrafen Gebiete nahe der türkischen Grenze. Dies verwundert nicht, denn in Teilen der Türkei ist die Maul- und Klauenseuche endemisch. Auch Bulgarien als europäisches Nachbarland zur Türkei erlebte 1991, 1993 und 1996 Ausbrüche dieser Krankheit durch den Erregertyp 0. Italien verzeichnete 1993 insgesamt 57 Fälle der Maul- und Klauenseuche, davon vier in der Umgebung von Verona, der Rest im Süden des Landes. Auch hier erschien der Typ 0, der vermutlich aus dem vorderasiatischen Raum durch illegale Tiertransporte eingeschleppt wurde. 1996 auf dem Balkan hingegen war es ein Typ A_{22}-ähnliches Virus, das die Seuche verbreitete. Dies verdeutlicht, dass sich die Virusvarianten nicht vorhersehen lassen. Wir müssen jederzeit mit den unterschiedlichsten Typen rechnen. In allen genannten Fällen gelang es aber, die Seuche letztlich wieder zu eliminieren – so in den betroffenen Regionen Albaniens und Mazedoniens mit Unterstützung der Europäischen Union durch Notimpfungen und Keulung der betroffenen Bestände.

Im letzten Jahr traten in EU-Ländern zwei bedeutsame Epidemien von Liste-A-Krankheiten auf: Blauzungenkrankheit der Wiederkäuer und Geflügelpest. Die Blauzungenkrankheit suchte Italien und Frankreich zum ersten Mal überhaupt heim (mit 6144 Ausbrüchen vor allem in Sardinien, Kalabrien und auf Sizilien sowie mit 31 Ausbrüchen auf Korsika). Das seit 1960 von der Krankheit nicht mehr berührte Spanien meldete 505 Ausbrüche auf den Balearen-Inseln Mallorca und

QUELLE: WORLD ANIMAL HEALTH REPORTS 1999



Im Jahr 1999 haben die hier rot markierten Länder Seuchenzüge von Tierkrankheiten gemeldet, die in der so genannten Liste A erfasst sind. Meldungen aus den gelb markierten Ländern liegen nicht vor (dies ist aber nicht gleichbedeutend mit „frei von Tierseuchen der Liste A“).

Menorca. Auch in Griechenland gab es Krankheitsfälle. Der Erreger, ein Virus, wird sowohl durch infizierte Tiere als auch durch bestimmte Stechmücken übertragen. Er verursacht Fieber und Entzündungen. Umfangreiche Impfungen und Handelsbeschränkungen konnten eine noch größere Epidemie verhindern.

Die klassische Geflügelpest, eine Influenzavirus-Infektion, brach im letzten Jahr im Norden Italiens in 346 Betrieben aus, insbesondere in der Provinz Verona. Ein in den Geflügelbeständen bereits vorhandenes, bis dahin relativ harmloses Virus, das bisher nur geringe Verluste verursacht hatte, war spontan zu einem gefährlichen Erreger mutiert. Die Epidemie erfasste mehr als 15 Millionen Vögel, hauptsächlich Puten und Hühner. Zu den wichtigsten Bekämpfungmaßnahmen gehörten Tötung infizierter Bestände und umfangreiche Impfungen. Damit gelang es bisher, die Seuche zu kontrollieren. Noch ist der Erreger aber nicht eliminiert, sodass weiterhin Gefahr droht.

Fragwürdiger Umgang mit dem Risiko

In der heutigen Diskussion über Tierseuchen ist die „prominenteste“ gewiss die „Rinderseuche“ BSE (*bovine spongiform encephalopathy*). Diese Infektionskrankheit, die Nervenzellen zerstört, wird höchstwahrscheinlich von einem neuartigen Erreger – einem fehlgefalteten Protein – hervorgerufen, einem so genannten Prion. Ähnliche Erkrankungen sind beim Menschen und bei Tieren schon länger bekannt, drangen aber früher kaum in die Öffentlichkeit. Erst das Ausmaß von BSE insbesondere in Großbritannien und die Verbindung dieser Rinderseuche zu einer neuen Variante der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit des Menschen brachten die Schlagzeilen. Als wahrscheinlichste Ursache der Rinderseuche gilt die Verfütterung von Proteinen, die aus Wiederkäuern stammen, an Rinder. Dass BSE in Großbritannien erstmals und zahlreich auftrat, lässt sich mit veränderten, gewissermaßen laxeren Herstellungsverfahren von Futter aus Tierkörpermehlen und anderen Produkten aus Tierkörperbeseitigungsanlagen erklären. An Rinder Mischfuttermittel zu verfüttern, die Tiermehl enthielten, war in den achtziger Jahren gängige Praxis.

In andere Länder gelangte BSE wahrscheinlich von Großbritannien aus durch den Handel mit Tieren und kontaminierten Futtermitteln. Zunächst meldeten Irland (im Jahre 1989), die Schweiz (1990) und Frankreich (1991) BSE-Fälle bei Rindern aus dem eigenen Land, später Portugal (1994), die Niederlande (1997), Belgien (1997) sowie Luxemburg (1997). Schon Anfang der neunziger Jahre registrierten auch mehrere europäische Staaten an BSE erkrankte Rinder, die aus Großbritannien stammten. Heute wird deutlich, dass von der Seuche die Rinderpopulationen aller derjenigen Länder betroffen sind, die im europäischen Binnenmarkt im letzten Jahrzehnt einen intensiven Warenaustausch praktizierten. Wie sich nun erwies, blieben auch Deutschland, Dänemark, Spanien und Italien nicht verschont.

Die Rinderseuche BSE ist also ein typisches Beispiel dafür, wie leicht sich Krankheiten durch Handel mit leben- ▶

den Tieren und Produkten tierischer Herkunft verbreiten. Der Mensch hat also einen großen Einfluss auf Entstehung und Verbreitung von Tierseuchen.

Global betrachtet galten 1999 unter anderem die Vereinigten Staaten und die skandinavischen Länder als frei von den Liste-A-Tierseuchen (Grafik Seite 95). Hier kann auf ein effizientes Überwachungs- und Meldesystem vertraut werden. Allerdings können auch dort jederzeit für Tier und Mensch gefährliche Infektionskrankheiten eingeschleppt werden. Das belegt das jüngste Auftreten des West-Nil-Virus an der US-amerikanischen Ostküste, das dort bisher nie vorkam. Der subtropische Erreger wird von Stechmücken übertragen und ruft beim Menschen Hirnhautentzündung hervor.

Die Zahlen der gemeldeten Krankheitsfälle geben kein vollständiges Bild, denn bestimmte Tierseuchen kommen in vielen Ländern endemisch, also permanent und flächendeckend, vor. Einzelausbrüche werden deshalb oft nicht weitergemeldet. Häufig fehlt auch die Infrastruktur, um alle Fälle zu diagnostizieren und weiterzuleiten. Letztlich spielt die wirkliche Zahl der Ausbrüche in diesem Kontext eigentlich auch keine Rolle, solange das Vorkommen überhaupt bekannt ist.

Was aber besagen die Daten über die Verbreitung von Tierseuchen heute? Gewisse Trends mögen sich zwar aus ihnen ableiten lassen. Doch keinesfalls zeigen sie, dass die Epidemien in neuerer Zeit insgesamt stetig zurückgegangen wären. Tierseuchen waren und sind weltweit verbreitet, und dies dürfte auch in Zukunft so bleiben.

Die Gefahr, dass die Erreger auch in bislang nicht betroffene Regionen gelangen, ist indessen in den letzten Jahren weiter gestiegen. Mehrere Gründe haben dazu beigetragen:

➤ die weitgehende Liberalisierung des Handels und somit der freie Zugang zu Märkten durch den Abbau von Zoll- und Handelsbeschränkungen;

➤ die Transporte von Tieren und tierischen Produkten über große Distanzen, auch auf andere Kontinente;

➤ die Erweiterung des Weltmarktes durch politische Öffnung von Drittstaaten, insbesondere im asiatischen und afrikanischen Raum;

➤ die drastische Zunahme des weltweiten Reiseverkehrs.

Nicht nur Tierseuchen, sondern Seuchen insgesamt stellen auch künftig eine Herausforderung für die Menschheit dar. Wenngleich gegenwärtig besonders die Rinderseuche BSE und die Maul- und Klauenseuche viel Aufmerksamkeit erregen, dürfen wir nicht vergessen, dass seit den achtziger Jahren weltweit eine neue Seuche grassiert, die Millionen Tote fordert und ganze Länder in den Ruin treibt: AIDS, die erworbene Immunschwäche.

Nicht die angebliche „Rückkehr der Seuchen“ muss uns alarmieren. Sie waren nie verschwunden. Wichtig ist heute aber, dass wir die ständige Bedrohung wieder ernst nehmen. ■

*Der Biologe **Thomas C. Mettenleiter** ist Präsident der Bundesforschungsanstalt für Viruskrankheiten der Tiere (BFAV) und Leiter des zugehörigen Instituts für Molekularbiologie auf der Insel Riems bei Greifswald. **Matthias Kramer** ist Veterinärmediziner am Institut für Epidemiologie der BFAV in Wusterhausen.*

ETHIK UND MEDIZIN

Die Debatte um das therapeutische Klonen

Wie sollen Forschung und Gesellschaft mit den ethischen Herausforderungen umgehen, die mit dem Klonen von Organismen und der Züchtung menschlicher embryonaler Stammzellen verbunden sind?

Von Ernst-Ludwig Winnacker

Im April 2000 trat Bill Joy, Forschungsleiter der Firma Sun Microsystems, mit einer provozierenden These an die Öffentlichkeit: Drei Technologien – Gentechnik, Nanotechnik und Robotik – entwickelten sich in einer Weise, dass sie zu einer Bedrohung für die Menschheit auswüchsen. Man solle die dahingehenden Forschungen entweder gleich ganz verbieten oder doch im Rahmen einer Volksbefragung darüber abstimmen lassen, ob die Bürgerinnen und Bürger diese Entwicklungen überhaupt wollten.

Aber können Forschungsverbote eine Antwort auf die diversen Krisen unserer Zeit sein? Probleme sind eher durch mehr als durch weniger Wissenschaft zu bewältigen. Die Wissenschaftler selbst, die in dieser Art von Diskussionen befangen sind, können nur der Gesellschaft mit einem Ausmaß an Transparenz begegnen, das sie bislang nicht kannten und an das sie sich gewöhnen müssen.

Nehmen wir als Beispiel das Klonen. Vor knapp fünf Jahren haben Forscher des Roslin-Instituts bei Edinburgh erstmals ein erwachsenes Säugetier geklont. Sie übertrugen den Zellkern einer kultivierten Schaf-Euterzelle in eine „entkernte“ Eizelle eines anderen Schafs. Das Resultat namens Dolly war eine wissenschaftliche Sensation – hatte man doch bis dahin angenommen, die Entwicklungsuhr einer spezialisierten Körperzelle ließe sich nicht mehr auf Null zurückstellen, das heißt auf das Niveau einer ganz frühen Embryonalzelle.

Inzwischen haben Forscher auch andere Säugetiere wie Rinder, Ziegen, Schweine und Mäuse nach dem Dolly-Prinzip geklont. Der Aufwand ist allerdings enorm, die Ausbeute gering. Für Dolly wurden mehr als 400 Eizellen von hormonell stimulierten weiblichen Schafen entnommen und – nach dem Absaugen ihrer Chromosomen – mit einer Euterzelle als Kernspender verschmolzen. Von den 277 dann entstandenen Embryonen entwickelten sich in der ersten Woche nur ein Zehntel programmgemäß weiter. Sie wurden in 13 „Leihmütter“ verpflanzt, aber nur ein einziges lebensfähiges Lamm kam schließlich zur Welt.

Nach den bisherigen Erfahrungen an Nutztieren bleiben lediglich wenige Prozent der ursprünglich erzeugten Klon-Embryonen bis zur Geburt am Leben – was aber nicht gleichbedeutend mit lebensfähig ist. Viele der geklonten Tiere sind übergroß oder sonst wie geschädigt; ihre Todesrate kurz vor oder nach der Geburt liegt zwischen 40 und 75 Prozent.

Während eineiige Zwillinge – natürliche Klone – genetisch identisch und gleich alt sind, erlaubt es die Dolly-Technologie, auch Klone von bereits erwachsenen Individuen zu erzeugen, ja sogar von verstorbenen, sofern Zellen davon in einer Kultur überdauert haben.

Es ist davon auszugehen, dass die Technik im Prinzip auch auf den Menschen anwendbar ist. In den USA und in Italien haben sich bereits die ersten Hasardeure gemeldet, die genau das tun wollen. Was sie aber nicht gesagt haben, ist:

➤ wie sie die jeweils hundert Leihmütter verpflichten wollen, die sie für ein einziges lebend geborenes Klon-Kind brauchen, weil die anderen schon vor Ende der normalen Schwangerschaftsdauer verloren gehen,

➤ was sie mit den vielen Kindern zu tun gedenken, die mit schwersten Defekten zur Welt kommen. Wollen sie selbst für deren Pflege aufkommen oder dies der Allgemeinheit anlasten?

Ich halte Versuche dieser Art für unwissenschaftlich und unvertretbar.

Nun spricht man indes seit einiger Zeit nicht nur vom organismischen Klonen à la Dolly, sondern auch vom „therapeutischen“ Klonen. Dabei wird der nach dem Dolly-Verfahren hergestellte Embryo nur als Mittel zum Zweck erzeugt. In einem ganz frühen Entwicklungsstadium, wenn er erst ein winziges Keimbläschen darstellt, enthält seine innere Zellmasse so genannte pluripotente Stammzellen, die noch fast alle Zelltypen hervorbringen können. Unter geeigneten Kulturbedingungen, so die Zukunftsvision, sollten entnommene embryonale Stammzellen sich weiter vermehren und gezielt in die gewünschte Zell- oder Gewebeart umwandeln lassen. Das Verfahren hätte den Vorteil, dass die Zellen eines solchen Transplantats das Erbgut des Patienten enthielten und deshalb nicht abgestoßen würden.

Dass es die Cocktails bislang nicht gibt, die kultivierte menschliche Embryonalzellen gezielt zur Entwicklung eines gewünschten Gewebes oder gar Organs zwingen, wird in den Diskussionen oft verschwiegen. Ebenso ignoriert wird die Problematik, dass diese Zellen in ihrer Mehrzahl schwer wiegende Entwicklungsdefekte aufweisen müssen, wie die niedrigen Ausbeuten gesunder geklonter Organismen deutlicher nicht zeigen können. Die genetische Reprogrammierung von Körperzellen – das rätselhafte Zurückdrehen der Entwicklungsuhr – ist zwar möglich, aber wohl reines Glücksspiel.

Deshalb kann es im derzeitigen Stadium nicht angehen, Zellen aus Klon-Embryonen zu therapeutischen Zwecken einzusetzen. Die Herstellung von Embryonen zu Forschungszwecken nach dem Dolly-Verfahren lehnt die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) daher auch in ihren neuen Empfehlungen ab, die Anfang Mai vorgelegt wurden.

Einige Wissenschaftler spielen deshalb mit dem Gedanken, ihre Therapieziele – wie etwa den Ersatz von abgestorbenem oder geschädigtem Hirn- und Herzgewebe – über Stammzellen aus anderen Quellen zu erreichen.

Schwierige Güterabwägung

Tierische embryonale Stammzellen sind seit langem ein unverzichtbares Werkzeug moderner Zellbiologie. Aus Keimbläschen von Mäusen gewonnen, werden sie als Zell-Linien in Dauerkultur unbegrenzt vermehrt. Sie behalten dabei ihre Fähigkeit, alle Zelltypen auszubilden, die in einem erwachsenen Tier auch vorkommen, inklusive der Ei- oder Samenzellen. Dies zeigt sich, wenn man sie wieder in einen sich entwickelnden Mäuse-Embryo steckt. Was sie aber nicht können: sich ganz alleine zu einem intakten Tier entwickeln. Dies vermag nur eine befruchtete Eizelle.

Embryonale Stammzell-Linien lassen sich zudem genetisch verändern. So war und ist es nach Einbau solcher Zellen in einen Mäuse-Embryo möglich, die Rolle einzelner Gene im Kontext eines Organismus zu studieren und Tiermodelle für menschliche Krankheiten zu entwickeln, beispielsweise für Krebs, aber auch für neurologische Erkrankungen.

Vor drei Jahren gelang es erstmals einem Forscherteam um James Thomson von der Universität von Wisconsin, auch menschliche embryonale Stammzellen in Dauerkultur zu züchten. Ihnen wird große Bedeutung beigemessen:

➤ in der Anwendung, weil embryonale Stammzellen der Maus defektes Gewebe – beispielsweise im Umfeld einer Rückenmarkverletzung – besiedeln und teilweise reparieren können, was man sich auch von den menschlichen Pendants erhofft;

➤ in der Forschung, weil embryonale Stammzellen in Kultur möglicherweise direkt in bestimmte Körperzellen oder gar Gewebe umgewandelt werden können, sodass sich dort die molekularen Grundlagen der Differenzierung ermitteln lassen.

Thomsons Zellen stammten aus „überzähligen“ Embryonen von Reagenzglas-Befruchtungen. Die Herstellung, aber auch der Einsatz solcher Zellen zu Forschungszwecken ist in vielen Ländern verboten. Die DFG hingegen empfiehlt nun, die Verwendung „überzähliger“ Embryonen dafür freizugeben.

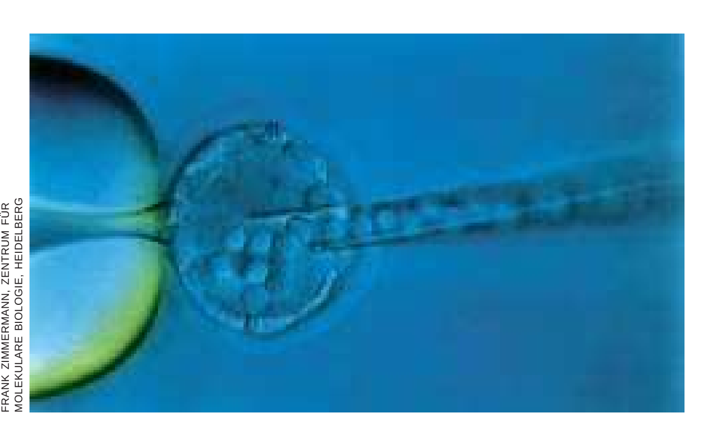
In der hier zu Lande geführten ethischen Diskussion geht es einerseits um die grundgesetzlich geschützte Forschungsfreiheit und andererseits um die Schutzwürdigkeit des menschlichen Embryos. Der ethische und rechtliche Schutz beider Güter ist nicht absolut. Die Freiheit der Forschung kann durch die Grundrechte auf Menschenwürde sowie auf Leben und Gesundheit eingeschränkt sein. Auch der Schutz des menschlichen Embryos ist nicht absolut gewährt, da der Gesetzgeber bestimmte Verfahren der Empfängnisverhütung gestattet und auch den Schwangerschaftsabbruch unter bestimmten Bedingungen von der Strafverfolgung ausnimmt. Beide Beispiele zeigen, wie die ethische Urteilsfindung auf einem Prozess der Güterabwägung beruht, den die Gesellschaft in die eine oder andere Richtung zu lenken vermag.

Im Falle der Verwendung menschlicher Embryonen zu Forschungszwecken wird dieser Prozess an der Hochrangigkeit der Forschungsziele zu messen sein. Gewiss stellt die Aussicht auf Heilung schwerer und schwerster Krankheiten ein hohes Ziel dar, das möglicherweise den Verlust menschlicher Embryonen aufwiegen könnte – zumal solcher, die zwar zur Herbeiführung einer Schwangerschaft erzeugt wurden, aus dem einen ▶



YORGOS NIKAS, HAMMERSMITH HOSPITAL, LONDON

Aus einer so genannten Blastocyste, einem frühen Stadium eines Embryos, können die Wissenschaftler embryonale Stammzellen gewinnen. Ein solches Keimbläschen – auf dem Foto geöffnet – enthält den Embryonalknoten, der das Ausgangsmaterial für das Verfahren liefert. Aus embryonalen Stammzellen können theoretisch fast alle Zelltypen des Körpers hervorgehen: Man verspricht sich davon einmal Ersatz für geschädigtes Gewebe.



FRANK ZIMMERMANN, ZENTRUM FÜR MOLEKULARE BIOLOGIE, HEIDELBERG

Über eine Glaskapillare spritzen Wissenschaftler genetisch veränderte embryonale Stammzellen einer Maus in eine Blastocyste. Daraus entwickeln sich Mäuse, deren Zellen nicht alle die gleiche Erbinformation tragen.

oder anderen Grunde aber nicht zum Einsatz kamen und damit „überzählig" sind. Im konkreten Fall müsste aber die Hochrangigkeit spezifiziert werden; zumindest bedarf es eines realistischen wissenschaftlichen Hintergrunds. Mit Heilsversprechen alleine kann es nicht getan sein. Mir scheint, dass eine solche wissenschaftliche Grundlage für das therapeutische Klonen nicht gegeben ist.

Ob wir überhaupt embryonale Stammzellen zu therapeutischen Zwecken brauchen, wird nicht zuletzt von einer Alternative abhängen: den gewebespezifischen Stammzellen. Diese dienen als Vorläufer bestimmter Zelltypen, liegen somit in ihrem entwicklungsbiologischen Potenzial irgendwo zwischen dem eines Embryos und dem einer Körperzelle. Am besten bekannt sind die Stammzellen des Blut bildenden Systems, die überwiegend im Knochenmark lokalisiert sind. Im Blut kommen sie selten vor; nur eine unter 10 000 Zellen ist dort eine Stammzelle. Doch eine einzige davon vermag ein ganzes, intaktes Immunsystem aufzubauen. Bei Knochenmarktransplantationen wird dieses Potenzial mit Erfolg genutzt. Inzwischen haben Forscher Stammzellen in allen unseren Organen gefunden, selbst im erwachsenen Gehirn, das lange als nicht regenerationsfähig galt. Gewebespezifische Stammzellen lassen sich nach neuesten Erkenntnissen sogar ineinander umwandeln, Blut bildende Stammzellen etwa in solche für Muskelzellen.

Weder die embryonalen noch die gewebespezifischen Stammzellen haben bisher ihr wahres Potenzial demonstrieren können. In beiden Fällen steht die Wissenschaft noch ganz am Anfang. Immerhin hat die anhaltende Diskussion um die embryonalen Stammzellen dazu geführt, dass nun Forscher intensiv über gewebespezifische Stammzellen arbeiten.

Der richtige Umgang mit der Stammzellbiologie und mit stammzellbasierten Therapien wird zu einer Bewährungsprobe werden. Hier wird sich zeigen, ob die Biotechnologie den Dialog mit der Öffentlichkeit wirklich will und ob er ausreichende Selbstregulierungskräfte aufbringt, den richtigen Weg zu wählen. „Wo ist die Weisheit geblieben, die wir vor lauter Wissen verloren haben, wo das Wissen in der Flut von Information?", hat der Dichter T. S. Elliot einmal gefragt.

Sofern die Biotechnologie hierauf Antworten findet, wird sie so intensiv blühen, wie wir uns dies alle wünschen! ■

*Der Genetiker **Ernst-Ludwig Winnacker** ist Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).*

„AUSGEZEICHNET"

PHILIP-MORRIS-FORSCHUNGSPREIS

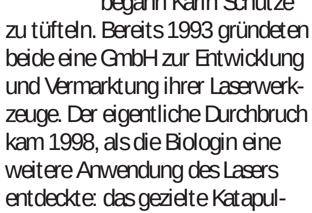
Licht als Universalwerkzeug

Die Mikrobiologie verdankt ihren Ursprung der Erfindung des Lichtmikroskops vor rund 400 Jahren. Doch die Generationen von Biologen, die seither mit diesem Instrument die faszinierenden Details der belebten Natur bestaunt haben, konnten nicht ahnen, dass sich das Licht zu wesentlich mehr eignet als zum bloßen Ausleuchten und Vergrößern der Präparate.

Lichtstrahlen können nämlich zum präzisen Bearbeiten von Gewebeproben und sogar von einzelnen Bestandteilen einer Zelle genutzt werden. Als winzige Pinzette oder Mini-Skalpell eingesetzt, lassen sich mit Licht beispielsweise lebende Zellen berührungslos und ohne Schädigung ausschneiden, bewegen und als Probe entnehmen (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/1998, S. 56).

Ermöglicht wird dieses universelle Werkzeug durch den Impuls, den die einzelnen Lichtteilchen, die Photonen, auf das beleuchtete Objekt übertragen. Der Lichtdruck ist zwar sehr klein, und er spielt in unserem Alltag deshalb keine Rolle. Bündelt man aber das intensive Licht eines Laserstrahls auf einen Brennfleck von weniger als einen Mikrometer Durchmesser, so entsteht dort ein Druck von dem Mehrfachen des Atmosphärendrucks. Eine Zelle, auf die der scharf fokussierte Strahl gerichtet wird, ist dann dem Vieltausendfachen der Erdbeschleunigung ausgesetzt.





Karin Schütze

Solche Laserwerkzeuge setzen die Wissenschaftler schon seit einigen Jahren in der Forschung ein. Doch diese Geräte sind in der Regel nur von Spezialisten zu bedienen und zudem störanfällig: Bereits ein leichter Stoß gegen den Tisch verändert den Fokus und macht eine aufwändige Nachjustierung erforderlich.

Mit diesen Problemen mochte sich die Biologin Karin Schütze nicht abfinden. Ihr schwebte ein einfach zu bedienendes Gerät mit möglichst wenigen Knöpfen vor, eines, „das man sechs Wochen ausschalten kann, und nachher ist der Fokus immer noch an derselben Stelle".

Gemeinsam mit ihrem Mann Raimund begann Karin Schütze zu tüfteln. Bereits 1993 gründeten beide eine GmbH zur Entwicklung und Vermarktung ihrer Laserwerkzeuge. Der eigentliche Durchbruch kam 1998, als die Biologin eine weitere Anwendung des Lasers entdeckte: das gezielte Katapultieren. Einzelne Zellen können damit, wenn sie aus einem Gewebepräparat ausgeschnitten sind, allein durch den Druck der Photonen in einen Probenträger katapultiert werden. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel einzelne Tumorzellen berührungslos aus einer Gewebeprobe entnehmen und für die weitere Analyse vorbereiten. Die Forscher können dann besonders aggressiv wachsende Krebszellen identifizieren und ihre Reaktion auf unterschiedliche Therapeutika testen.

Die wachsende Nachfrage nach dem innovativen Laserdruck-Katapult-Verfahren führte zum weiteren Ausbau der Firma, die mittlerweile als P.A.L.M. Microlaser Technologies AG im bayrischen Bernried residiert. Vorläufige Krönung der wissenschaftlichen Verdienste von Karin Schütze ist der mit 50 000 Mark dotierte Forschungspreis, den ihr die Philip-Morris-Stiftung im Juni überreicht. ■

 (Seiten 99 bis 102: Anzeigen und Beihefter)



Haartrocknung mit Wärmeflamme

Das bisher mit mancherlei Unbequemlichkeiten verbundene Waschen und Trocknen des Damenhaares wird durch den vom Hoffriseur Balke erfundenen ... Haartrocken-Apparat nicht allein ausserordentlich vereinfacht, sondern vor allen Dingen auf sehr natürliche Weise ... zur Durchführung gebracht. Das zu trocknende Haar wird über eine schaufelartige, siebförmig durchlöcherte Platte ausgebreitet, durch welche ein leichter, warmer und schnell wirkender Luftstrom getrieben wird. Dieser Luftstrom kann niemals das Haar angreifen und schädlich beeinflussen, auch wird jede lästige Wärmewirkung auf die Kopfhaut völlig vermieden. Für die Friseure ist die Handhabung des Apparates ... ausserordentlich einfach, indem nur eine Wärmeflamme anzustecken und der Elektro- oder Federmotor anzulassen ist. Jedenfalls sind die behandelten Damen ... mit dem neuen Apparat ausserordentlich zufrieden. *(Neuste Erfindungen in Bild und Wort, Heft 1, 1901, S. 6)*



Neuer Damen-Haartrocken-Apparat

Sprechendes Licht

Die bekannten Physiker von Bronk und Ruhmer, Berlin, haben einen neuen … Apparat konstruiert, der dazu dient, Phonogramme auf optischem Wege herzustellen. ... Das Verfahren besteht ... darin, dass ein mit Chromgelatine überzogener Zylinder ... von einer den Schallwellen analog undulierenden Lichtquelle belichtet wird. ... Man erhält so völlig reine Aufnahmen, da das undulierende Licht von der Trägheit der mechanischen Aufnahme-Vorrichtung völlig frei ist. Gelingt es, die ... komplizierten elektrischen Vorrichtungen zur Erzeugung des „sprechenden Lichtes“ durch einfachere ... zu ersetzen, so dürfte sich dieses neue Aufnahmeverfahren rasch ... einbürgern. *(Der Mechaniker, 9. Jg., Nr. 11, 1901)*

Eine neue Erklärung des Nordlichts

Der dänische Nordlichtforscher Poulsen ist ... zu der Überzeugung gekommen, dass das Spektrum der Nordlichtstrahlen ... übereinstimmt mit dem kathodischen Spektrum des Stickstoffs. Dadurch wird eine Erklärung von J. J. Thomson gestützt. ... Dieser nimmt ... an, dass alle Körper eine feine Strahlung aussenden, die den Becquerel-Strahlen entspricht und dass also auch die Sonne diese Eigenschaft besitzt. Wenn diese Art der Sonnenstrahlung in den Bereich der magnetischen Anziehung der Erde kommt, so wird sie nach deren magnetischen Polen abgelenkt und lässt Lichterscheinungen entstehen, die denen der Kathodenstrahlen in luftverdünnten Röhren ähnlich sind. *(Umschau, 5. Jg., Nr. 23, 1901, S. 458)*

1951

Albert Einstein überreicht Medaille

Auf einer Feierstunde anläßlich seines 72. Geburtstages überreichte Albert Einstein am 14. März 1951 in Princeton (USA) zum ersten Mal den Albert-Einstein-Preis, der aus einer Goldmedaille und einem Geldbetrag von 15000 Dollar besteht, zu gleichen Teilen an Julian Schwinger von der Harvard-Universität für seine ausgezeichneten Beiträge zur Quantenelektrodynamik und an Kurt Gödel vom Institute for Advanced Study in Princeton für seine hervorragenden Arbeiten über Mathematische Logik. *(Physikalische Blätter, 7. Jg., Heft 6, 1951, S. 270)*

Gut frisierter Germanenschädel entdeckt

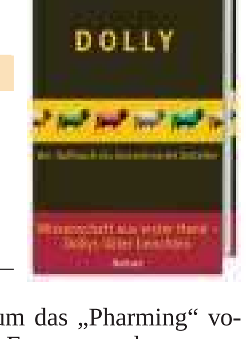
Tacitus berichtet in seiner „Germania“ über eine besondere Haartracht der Sweben, also des stärksten germanischen Stammesverbandes seiner Zeit: „Sie kämmen das Haar hoch und schlingen es zu einem Knoten zusammen“. Diesen „nodus suebicus“ erwähnen auch andere römische Autoren, er ist uns außerdem durch eine Reihe von Germanenbildnissen aus dem Altertum bekannt. ... Originalfunde fehlten bisher, da die Germanen überwiegend Feuerbestattung geübt haben. Nun aber wurde im Kreis Eckernförde im südlichen Holstein ein Kopf mit einer tadellos erhaltenen Frisur gefunden. Ganz wie die antiken Kunstdenkmäler es zeigen, ist hier das Haar zusammengenommen und über dem rechten Ohr zu einem kunstvollen Knoten geschlungen. *(Umschau, 51. Jg., Nr. 11, 1951, S. 343)*



Zeugnis germanischer Haarmode

Blutkonserven mit Arsen-Beigabe

Die segensreiche Bedeutung der Bluttransfusion ... wurde bisher durch eine Gefahr besonderer Art beeinträchtigt: mit allen bekannten Vorsichtsmaßregeln ist es bislang unmöglich, eine frische, bis 4 Wochen alte Syphilisinfektion beim Blutspender aufzudecken. ... Daher schlug Brock den Hoechster Farbwerken die Entwicklung eines spirochaeten-abtötenden, als Zusatz zum Transfusionsblut dienenden Präparates vor. Nach sorgfältigen Kontrollversuchen konnte eine geeignete Arsenverbindung gefunden werden. Chemisch handelt es sich um ein Arsenoxyd. ... Es wurden keine unerwünschten Nebenerscheinungen ... beobachtet. Die zur Abtötung der Erreger erforderliche Konzentration ist außerordentlich gering, so daß bei jeder Einzelgabe nur 1/200 der zulässigen Arsen-Einzelhöchstdosis zugeführt wird. *(Umschau, 51. Jg., Nr. 11, 1951, S. 346)*



REPRODUKTIONSBIOLOGIE

Ian Wilmut, Keith Campbell und Colin Tudge

Dolly

Der Aufbruch ins biotechnische Zeitalter

Aus dem Englischen von Hainer Kober. Hanser, München 2001.
405 Seiten, DM 49,80

Als vor einigen Jahren Wissenschaftler des staatlichen Roslin-Forschungsinstituts bei Edinburgh das „Klonschaf" Dolly vorstellten, erregte dies großes Aufsehen über die Fachwelt hinaus (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 34). Viel mehr als der Name des Tieres dürfte aber den wenigsten von uns im Gedächtnis geblieben sein. Obwohl das Thema Embryonenforschung derzeit in der öffentlichen Diskussion steht und die Biotechnologie einmütig als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts erachtet wird, fehlt sowohl Bürgern als auch Entscheidungsträgern einiges an biologischem Grundlagenwissen.

Diesem Zustand wenigstens teilweise abzuhelfen ist ein ehrgeiziges Ziel. Der englische Zoologe und renommierte Wissenschaftsautor Colin Tudge hat die Herausforderung angenommen, mit den „Vätern" von Dolly, Ian Wilmut und Keith Campbell – und dem Trio ist ein lesenswertes Buch gelungen.

Dolly – das erfahren wir gleich zu Anfang – war weder das einzige noch das erste geklonte Schaf, aber sie war das erste Säugetier, das nicht aus einer embryonalen, sondern einer bereits differenzierten Körperzelle geklont wurde. Auf welchen (Um-)Wegen die Autoren das erreichten, ist eine sehr persönlich und dennoch sachlich geschriebene, fesselnde Wissenschafts-Story.

Die verzweigte Vorgeschichte der Dolly-Arbeit führt einige Jahrzehnte zurück, denn die Kerntransplantation – Grundtechnik des Klonierens – ist mitnichten eine Idee des Gentechnik-Zeitalters: Schon 1938 schwebte dem durch seine Versuche zur Embryonalentwicklung von Amphibien bekannten Hans Spemann dieses „fantastische Experiment" vor, für das er damals noch nicht die technischen Möglichkeiten hatte. 1951 wurden Frösche auf diese Weise geklont, 1985 das erste Säugetier.

Wieso gerade das Schaf Dolly dann als so großer Erfolg gefeiert wurde, wird erst im Kontext des Forschungsprojektes verständlich: Man wollte nicht einfach Tiere vervielfältigen – es ging darum, Genmanipulation an Nutztieren praktikabel zu machen, um das „Pharming" voranzubringen, die Erzeugung pharmazeutisch wirksamer Substanzen zum Beispiel aus der Milch genmanipulierter Nutztiere (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/1997, S. 70).

Transgene Tiere hatte man bisher durch Gentransfer auf die noch völlig undifferenzierten Zellen ganz junger Embryonen erzeugt. Diese Methode hatte den Nachteil langer Wartezeiten und eines hohen Verbrauchs an Individuen: Frühestens am Jungtier, das sich – selten genug – aus dem genmanipulierten Embryo entwickelt hatte, stellte sich heraus, ob das betreffende Gen überhaupt übertragen worden war und wie geplant funktionierte. In einer Zellkultur hingegen lässt sich eine Genmanipulation gut kontrollieren, und man kann anschließend gezielt die erfolgreich modifizierten Zellen weiterverwenden. Aus ihren Nachkommen könnten nun theoretisch lauter neue, gentechnisch veränderte Individuen entstehen, wenn Zellen in Kultur sich nicht fast immer differenzieren und damit ihre Fähigkeit verlieren würden, zu einem kompletten Organismus mit all seinen verschiedenen Geweben heranzuwachsen (siehe Wilmuts Artikel in Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 34).

In diesem Dilemma hatte Campbell die Idee, gezielt solche kultivierten Zellen zu klonieren, die sich gerade in der „G0"-Phase des Zellzyklus, einer Art Ruhezustand, befinden. Unter bestimmten Umständen ist aus diesem Stadium heraus offenbar eine vollständige Embryonalentwicklung aus einer bereits differenzierten Zelle möglich. Genau dieses Vorgehen führte zu Dolly. Die verwendete Zellkultur war aus Brustdrüsengewebe eines Mutterschafs angelegt worden.

Um diese Geschichte zu erzählen, nehmen die Autoren den Leser mit auf breit angelegte Exkurse in die Biologie der Zelle und der Fortpflanzung. Eine ganze Palette von Themen wird – leider fast ohne Illustrationen – auf aktuellem Wissensstand behandelt; auch der nicht einschlägig vorgebildete Leser ist angesprochen, denn Chromosomen- und Genstruktur, Mechanismen der Zellteilung oder Vorgänge der Embryonalentwicklung werden von Grund auf erklärt. Zur Auflockerung gibt es immer wieder Einblicke in den Forscher-Alltag, von den handfesten Aspekten der Arbeit mit Schafen bis hin zu den Mühen und Tücken der Forschungsfinanzierung.



Ian Wilmut mit Polly, einem weiteren Klon-Schaf

Dem Reizthema „Menschen klonen" ist ein eigenes Kapitel gewidmet. Die Autoren reklamieren nicht das Recht, „dem Rest der Menschheit vorzuschreiben, was er mit der Methode anzufangen hat", beziehen aber eindeutig Stellung gegen das Klonen als Fortpflanzungsmethode, vor allem weil unvermeidlich das Wohl des Kindes – auch das seelische – auf der Strecke bleiben würde. An der prinzipiellen Machbarkeit besteht kein Zweifel, aber hinsichtlich des Aufwandes lohnt sich ein Blick auf die Ausmaße des Dolly-Experiments: Über vierhundert Eizellen, von hormonell stimulierten Schafen entnommen, wurden manuell entkernt und mit den neuen „Spenderkernen" versehen. 277 so entstandene Embryonen wurden in vorläufige Leihmütter eingesetzt (die sicherste Möglichkeit, sie zur Weiterentwicklung anzuregen). Nur 29 Embryonen wurden etwa eine Woche später im erwarteten Entwicklungsstadium vorgefunden und in insgesamt 13 endgültige Leihmütter verpflanzt, und am Ende wurde ein einziges gesundes Lamm geboren – Dolly. Enormer Arbeitsaufwand, hoher Verbrauch an Eizellen und eine geringe Erfolgsquote sind in diesem Geschäft nichts Ungewöhnliches. Um Menschen zu klonen, würde man allerdings menschliche Eizellenspenderinnen und Leihmütter brauchen.

Das therapeutische Klonen von Körpergewebe sehen die Autoren dagegen sehr positiv, obwohl diese Technik menschliche Embryonen verbraucht; sie stützen sich lapidar auf das – nicht näher begründete – Argument, dass ein menschlicher Embryo „bis zum Alter von 14 Tagen … noch nicht den Status der Personalität erworben“ habe. Hier ist ihre Argumentation erkennbar stark von ihren eigenen Forscher-Interessen geprägt.

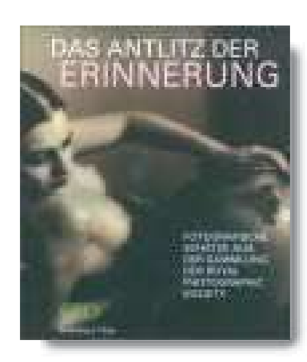
Darüber hinaus findet sich in dem Buch eine Fülle von Fakten und Diskussionsgrundlagen. Wilmut und Campbell gehen undogmatisch auf wünschbare und weniger wünschbare Entwicklungen ein und auf die Rolle der Politik und der Wirtschaft, und sie ermutigen ausdrücklich zur gesellschaftlichen Willensbildung. Das macht das Buch sehr sympathisch.

Sein einziger echter Schwachpunkt ist der Mangel (sogar im Glossar) an begrifflicher Genauigkeit, was nicht allein auf das Konto des Übersetzers gehen dürfte. So werden zum Beispiel die Begriffe Oozyte, Eizelle und Keimzelle nicht immer ihrer Definition (zumindest im Deutschen) entsprechend gebraucht; Base und Nukleotid werden gleichgesetzt; zwei halbe Chromosomensätze vereinigen sich schon mal zu einem doppelten. Metaphasechromosomen als „diploid“ zu bezeichnen ist nur unkonventionell; mit den sonderbaren Pluralbildungen „Kodonen“ und „Histonen“ könnte man leben, aber „zweite Meiose“ statt „zweite Reifeteilung“ oder „Meiose II“ ist einfach falsch. Wer sich also in Verwirrung gestürzt sieht, verzweifle nicht gleich an sich selbst, sondern nehme ein einschlägiges Biologie-Lexikon zur Hand.

Abgesehen davon ist „Dolly“ jedoch eine Fundgrube, in der es in jeder Hinsicht viel zu lernen und zu entdecken gibt und die zur eigenen Meinungsbildung regelrecht animiert.

Hilde Fischer

Die Rezensentin ist promovierte Biologin. Sie arbeitet in Bindlach (Oberfranken).



FOTOGRAFIE

Pam Roberts (Hg.)

Das Antlitz der Erinnerung

Fotografische Schätze aus der Sammlung der Royal Photographic Society

Aus dem Englischen von Suzanne Fischer.
GEO/Frederking & Thaler, Hamburg/München 2001.
336 Seiten, DM 98,–

Die Royal Photographic Society, 1853 gegründet als „Photographic Society of London“, war über lange Zeiten ihres Bestehens „eine Art fotografische Selbsthilfegruppe“. Wohlhabende Mitglieder der englischen Gesellschaft – Fotografie war ein extrem teures Vergnügen – trafen sich regelmäßig zum Austausch über technische Neuerungen, ihre Erfahrungen und ihre Werke. Vornehmlich aus Arbeiten ihrer Mitglieder hat die Royal Photographic Society ein Archiv aus mehr als 270 000 Bildern angesammelt, aus dem das vorliegende Buch eine Auswahl von Highlights präsentiert. Man erfährt auch einiges über die Entwicklung der verschiedenen Techniken, von den mit Pech beschichteten Platten des Nicéphore Niépce (Spektrum der Wissenschaft 2/1997, S. 52) und den wenig später folgenden Daguerreotypien bis zur Handkamera und zum Rollfilm.

Aber das steht im Anhang oder wird nebenbei erwähnt, als ein Faktor, der die künstlerische Arbeit einengte oder in eine bestimmte Richtung drängte: So bevorzugten die Verwender des Autochromverfahrens, einer Frühform des Diapositivs, satte Rottöne, weil diese besonders eindrucksvoll zur Geltung kamen.

In den Vordergrund hat die Herausgeberin den Ausdrucks- und Gestaltungswillen der Fotografen gestellt. So arbeitet sie heraus, dass britische Landschaftsfotografen bevorzugt die vom Menschen geformte, wohlgeordnete Natur abbildeten und wilde, unberührte Landschaften vernachlässigten, während ihre amerikanischen Kollegen sich aus einleuchtenden Gründen gerade darauf konzentrierten.

Man braucht eine Weile, um die an Massen technisch perfekter Bilder gewöhnten Augen umzuschalten auf Werke, denen man die Mühe ihrer Herstellung oft nur zu deutlich ansieht. Aber dann sind sie höchst eindrucksvoll.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Der Brite Stanley Crook neigte in seinen Aufnahmen von Vögeln zur Vermenschlichung der Tiere. Diese Waldkäuzchen hat er um 1930 in der Nähe seines Wohnorts Clitheroe (Lancashire) aufgenommen.



Nachdem ihre Werke im Jahr 1913 wiederentdeckt und veröffentlicht wurden, beeinflusste Julia Margaret Cameron (1815–1879) mit ihren Nahporträts (hier zwei Kinder des zweiten Earl of Lichfield, 1870) den Stil zahlreicher Nachfolger.

MATHEMATIK

Alexei Sossinsky

Mathematik der Knoten

Wie eine Theorie entsteht

Aus dem Französischen von Hainer Kober.
Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2000. 160 Seiten, DM 16,90



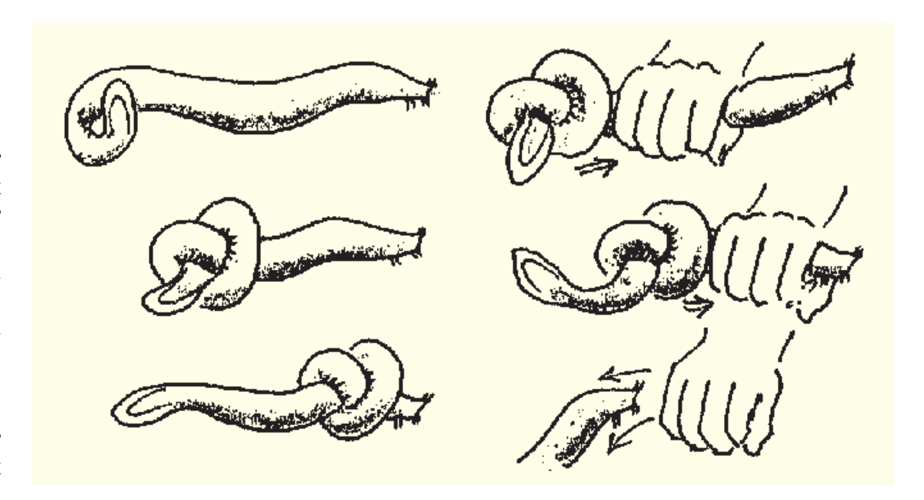
Die Knotentheorie, heute ein Teilgebiet der Topologie, beschäftigt sich zwar mit abstrakten Objekten, aber deren Realisierungen sind genau die Knoten, die jedem von uns aus dem Alltag bekannt sind. Häufig kann man daher Argumente der Theorie am konkreten Knoten nachvollziehen, ohne auf den mathematischen Formalismus zurückgreifen zu müssen.

Der in Frankreich geborene russische Knotentheoretiker Alexei Sossinsky, Mitglied der russischen Akademie der Wissenschaften und Autor zahlreicher Bücher, hat sich viel vorgenommen: Vom Leser mit gründlicher wissenschaftlicher Vorbildung bis zum neugierigen mathematischen Analphabeten soll jeder von der Lektüre profitieren können. Das ist so unmöglich wie die Quadratur des Kreises; aber wie gut ist seine Näherungslösung?

Ein mathematisch geschulter Leser, auch wenn er kein Spezialist in Knotentheorie ist, wird exzellent bedient; für den interessierten Laien sieht es nicht ganz so rosig aus. Zwar gibt es immer wieder Perlen der Darstellungskunst, aber sie sind nicht leicht zu finden. Man halte sich auf keinen Fall an die Zusage des Autors, die einzelnen Kapitel seien voneinander unabhängig und in beliebiger Reihenfolge zu lesen!

Besser, man beginnt ganz konservativ mit Kapitel 1 und lernt dort sehr schnell das zentrale, noch immer nicht vollständig gelöste Problem der Knotentheorie kennen, das Klassifikationsproblem. Wie kann man einen vorgelegten Knoten durch mathematische Eigenschaften so beschreiben, dass man ihn in beliebig deformierter Gestalt wiedererkennt? Gleichzeitig erfährt man etwas über die enge Verbindung von Mathematik und Physik im 19. Jahrhundert: Was hatten Lord Kelvins Wirbelatome, die damals im Zusammenhang mit einer Materietheorie diskutiert wurden, mit der Klassifikation von Knoten zu tun? Ein hervorragender Exkurs handelt von Wahrnehmung und Mathematik; leider macht der Autor häufig den Fehler, die aufschlussreichen Stellungnahmen über Arbeitsweisen und Motivationen von Mathematikern in Exkurse zu verbannen und damit dem Leser das Überspringen nahe zu legen.

Mit den Zöpfen ist es so ähnlich wie mit den Knoten: Die geometrische Realisierung mancher abstrakten mathematischen Zöpfe ergibt genau die wohl bekannte Mädchenfrisur – auch wenn ich mir so manchen mathematischen Zopf sicher niemals hätte flechten lassen. In Kapitel 2 geht es um den Satz von Alexander (1923), der besagt, dass man jeden Knoten durch Schließung eines bestimmten Zopfes erhält. Wer sich nicht von ungeklärten Begriffen abschrecken lässt und das Ziel, die Lösung des Klassifikationsproblems, im Auge behält, kann aus den guten und anschaulichen Beschreibungen zu diesem Satz viel über Beweismethoden und den Umgang mit Zöpfen und Knoten lernen.



Der Knoten des Schleimaals

Die nachfolgenden Kapitel schildern in chronologischer Reihenfolge zum einen verschiedene Ansätze, um das Klassifikationsproblem zu vereinfachen, vor allem die Ergebnisse von Kurt Reidemeister 1928, und zum anderen die besonders seit den siebziger Jahren mit viel Einsatz geführte und durch Erfolg gekrönte Suche nach so genannten Invarianten, die das Endziel der Klassifikation in greifbare Nähe gerückt haben (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 1/1991, S. 66). Invarianten sind algebraische Objekte (zum Beispiel das Jones-Polynom), die einer ebenen Darstellung eines Knotens zugeordnet werden, mit der Eigenschaft, dass sie sich bei bestimmten „zugelassenen“ Manipulationen des Knotens nicht verändern. Sie dienen dazu, das so genannte Vergleichsproblem zu lösen: Stellen zwei ebene Darstellungen eines Knotens den gleichen oder unterschiedliche Knoten dar?

Mit zunehmender Komplexität der mathematischen Theorie wird unweigerlich auch die nach wie vor hervorragende, nahezu ohne Formeln geführte Argumentation des Autors immer schwieriger. Die Zahl der nicht definierten Termini und der Rückgriffe auf vorhergehende Kapitel wird immer größer, und der Leser ohne mathematische Vorbildung muss sehr viel Durchhaltevermögen aufbringen. Dies gilt besonders für die im letzten Kapitel geschilderten, bis heute ungeklärten Beziehungen zwischen Knotentheorie und einer der wichtigsten Disziplinen der modernen Physik, der Quantenfeldtheorie.

Was das Buch auf keinen Fall liefert, ist die im Vorspann versprochene Geschichte der Knotentheorie. Sossinsky bemüht sich weder um verlässliche Angaben von Daten und Fakten noch um die Klärung der Hintergründe, ist auch nicht besonders daran interessiert, wie aus seinem Vorwort zu entnehmen ist, und nicht sehr belesen, wie aus den wenigen im Text verstreuten historischen Bemerkungen hervorgeht.

Dieses Buch bietet nicht in erster Linie tief gehende Informationen zu einer mathematischen Theorie und deren historischer Entwicklung, sondern etwas anderes, nicht minder Spannendes. Sossinsky gelingt es besonders in den letzten Kapiteln, die eigene Begeisterung für seinen Forschungsgegenstand überzeugend zu vermitteln und dabei auch seine Auffassungen von wissenschaftlichem Arbeiten, von Zielsetzungen, Lösungsversuchen, von Erfolgen und auch vom Scheitern plastisch darzustellen.

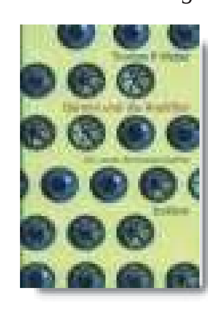
Diese Einblicke in den individuellen Forschungsalltag eines Mathematikers, die viel über sein Selbstverständnis als Wissenschaftler und seine Einschätzungen von der eigenen Disziplin und deren Bezügen zu Natur und Geisteswissenschaft aussagen, machen das Buch trotz mancher struktureller Mängel lesenswert.

Maria Reményi

Die Rezensentin ist Mathematikerin und Wissenschaftshistorikerin in Heidelberg.



BIOLOGIE



Thomas P. Weber

Darwin und die Anstifter

Die neuen Biowissenschaften

DuMont, Köln 2000. 270 Seiten, DM 39,80

Charles Darwin hat seine Evolutionstheorie keineswegs nur mit empirischem Material begründet. Er griff auch auf bevölkerungspolitische und sozialwissenschaftliche Theorien sowie die Erfahrungen der Tier- und Pflanzenzüchter zurück. Diese Mosaikstruktur der Evolutionstheorie erleichterte es später Vertretern vieler Ideologien, den Darwinismus für ihre Ziele in Richtung Eugenik, Politik, Arbeitsorganisation oder Religion zu vereinnahmen.

Mit dieser „Archäologie des Darwinismus" eröffnet Thomas Weber, Spezialist für theoretische evolutionäre Ökologie an der Universität Lund (Schweden), das vorliegende Buch. In dem folgenden, sehr knapp gehaltenen Teil über Soziobiologie und evolutionäre Psychologie misst er diese Theorien an ihrem Absolutheitsanspruch für die Erklärung gesellschaftlicher Verhältnisse und kommt zu dem Ergebnis, dass sie diesem Anspruch nicht gerecht werden. Angesichts der aktuellen Renaissance soziobiologischer Schriften ist Webers Kritik ein wichtiger Beitrag zur Debatte um die Auswirkung biologischer Theorien in der Gesellschaft. Die knappe Darstellung der Argumente und der zähe Stil machen diesen Abschnitt jedoch zu einem Fremdkörper in dem ansonsten angenehm zu lesenden Buch.

Der letzte Hauptteil des Buches ist der aktuellen Debatte um Gene, Gentechnik und daraus entwickelten Zukunftsvisionen gewidmet. Weber warnt vor einem Determinismus, der den Menschen zur „Genmaschine" erklärt, und zeigt auf, dass dessen Vertreter sich nur auf „sichere Tatsachen" berufen können, indem sie die Lücken der genetischen und entwicklungsbiologischen Kenntnisse zudecken.

Das Mosaik der allgemeinverständlichen, historischen und aktuellen Essays lässt selten das Gefühl aufkommen, alles sei bereits geklärt, und weckt so Interesse für eine intensivere Beschäftigung mit den angeschnittenen Fragen.

Weber hat dafür auch einen bibliografischen Anhang bereitgestellt, allerdings mit mangelnder Sorgfalt. So beklagt er, es sei ihm „nicht gelungen, über Etienne Geoffroy St. Hilaire weitere Sekundärliteratur zu finden"; dabei hätte er nur in der von ihm zitierten „Geschichte der Biologie" von Ilse Jahn nachzuschauen brauchen, um auf die von Eric Salf verfasste zweibändige (französischsprachige) Biografie Geoffroy St. Hilaires zu stoßen, des Zoologen, der Napoleon in Ägypten begleitete und Gegenspieler von Georges Cuvier im Pariser Akademiestreit war.

Der Autor erhebt „keinen Anspruch auf Originalität. Ich versuche, verschiedene alte und neue Deutungen des Materials in einem Gesamtbild zu vereinen, das helfen soll, einige Themen moderner Debatten zu verstehen." Dies ist ihm gelungen – ein verdienstvolles Unterfangen schon wegen der heftigen Diskussion um die Biotechnologie.

Aber auch der Darwinismus hat sich noch keineswegs überall herumgesprochen. „Die Welt ist voller Schrecken und voller Schönheit. Alles ist in ihr wohl geordnet, und nichts ohne Sinn. Daraus webt sich der Teppich des Lebens." Dieses Zitat stammt nicht von Naturtheologen des 18. Jahrhunderts, sondern aus einem Werbefilm des Bertelsmann-Verlages, mit dem auf der Expo 2000 im „Planet of Visions" für die Zukunftsgestaltung dieser Erde geworben wurde. Gegen diese vordarwinistische Form der Indoktrinierung kann nur umfassende und weit verbreitete Information helfen. Das Buch von Thomas P. Weber ist hierzu ein wichtiger Beitrag.

Jürgen Rieß

Der Rezensent betreut Projekte zur Wissenschafts- und Technikgeschichte Dresdens im Förderverein für Wissenschaftler, Ingenieure und Marketing e. V. in Dresden.

UR- UND FRÜHGESCHICHTE

Günther Stoll und Rüdiger Vaas

Spurensuche im Indianerland

Exkursionen in die Neue Welt

Hirzel, Stuttgart 2001. 408 Seiten, DM 68,–



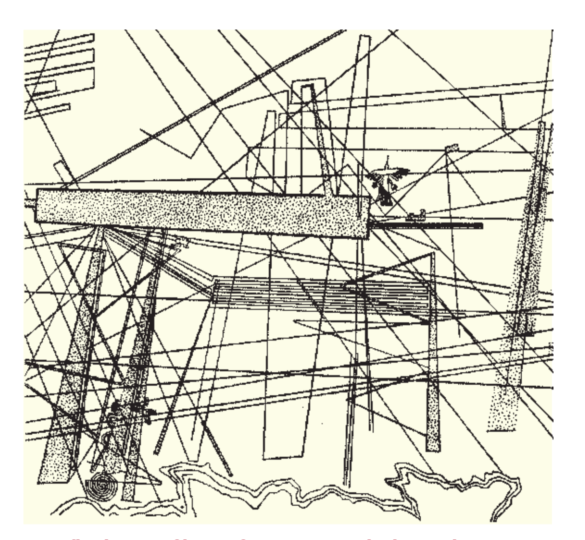
Die frühen Einwanderer in die Neue Welt kamen über Ostasien und den extremen Nordosten Sibiriens nach Alaska. Sie machten sich in kleinen Horden schweifend die neue Umwelt zu Eigen und verbreiteten sich dabei schnell über den Doppelkontinent bis nach Feuerland. Dabei rotteten sie durch Jagd die gesamte Großtierfauna aus („Blitzkrieg").

Nach neueren Funden früher Menschen aus Südamerika muss man von verschiedenen Einwanderungen ausgehen, die sich über den Zeitraum von 40000 bis 10000 Jahren vor heute erstreckten und durch Zeiten getrennt waren, in denen durch raues Klima die Verbindung zu den Herkunftsgebieten abriss; die heutigen Eskimo sind die Nachfahren der spätesten Einwanderergruppe.

Ein schlüssiges Gesamtbild dieser Geschichte ist nicht nur aus der Grabungsarchäologie zu gewinnen, sondern muss genetische Untersuchungen ausgewählter Populationen in Asien und Amerika, die linguistische Erforschung der Vielfalt der amerikanischen Eingeborenen-Sprachen sowie geoklimatische Rekonstruktionen mit einbeziehen. Die Autoren, beide Wissenschaftsjournalisten mit biologischer Vorbildung, tragen die jüngsten Beiträge zu diesem Gesamtbild vor, bis hin zu der – weniger wichtigen – Frage, ob die eiszeitlichen Jäger Küstenschiffer waren oder, ihrer Beute folgend, trockenen Fußes auf einen neuen Kontinent gelangten, ohne es recht zu bemerken.

Aus der Vielfalt der sich später entwickelnden indianischen Kulturen stellen die Autoren drei vor, die auf dem Territorium der heutigen USA angesiedelt waren. Das Kulturareal der Prärien und Plains mit seinen berittenen und federhaubengeschmückten Kriegern hat das Bild des Indianers in Deutschland am nachhaltigsten geprägt. Es war aber das späteste und flüchtigste, denn es hat in seiner Eigenart nur von etwa 1770 bis 1890 bestanden. Seine Entstehung verdankt es dem Zusammenspiel des von Europäern eingeführten und bald wieder ausgewilderten Pferdes mit den weiten Grassteppen Nordamerikas und den dort Bisons jagenden Indianern. Dieses Zusammenspiel von Mensch und Umwelt wird klar und treffend dargestellt. Und das ist eine erfreuliche Vertiefung der sonst oft hintergrundslosen und damit erklärungsarmen Populärdarstellungen über die kriegerischen berittenen Indianer.

Aus dem Osten nehmen sich die Autoren die vergangene Kultur der „Moundbuilder" vor, so genannt nach den monumentalen Erdwerken (*mounds*), die diese in den Flussniederungen des Ohio und Mississippi aufgeschüttet haben. Die Darstellung verflacht hier zu einem Erlebnisbericht und historischen Anekdoten aus der Forschung, ähnlich wie schon im einleitenden Kapitel über die europäische Landnahme. Doch entdeckt der aufmerksame Leser des entsprechenden Kapitels einen interessanten Aspekt, nämlich wie man durch Naturbeobachtung den Umgang längst untergegangener Völker mit ihren natürlichen Ressourcen erschließen kann, ohne selbst archäologisch zu arbeiten.



Das flächenmäßig größte Kunstwerk der Erde (mit etwa 500 Quadratkilometern) liegt in der Nähe der Stadt Nazca in Südperu. Es handelt sich um bis zu 30 Zentimeter tief in den Boden gescharrte Linien, Flächen und Figuren, darunter Vögel, ein Affe und eine Spinne.

Dem nordamerikanischen Südwesten, drittes Regionalthema des Buches, haben Archäologen seit jeher die größte Aufmerksamkeit gewidmet, ist das doch die einzige Region Nordamerikas, in der stehende Ruinen von Wohnsiedlungen ins Auge stechen. Anhand des Chaco Canyon mit seiner rätselhaften Großraumplanung und der Mesa Verde mit den intakt verlassenen burgenähnlichen Wohnsiedlungen in Felswänden beschreiben Stoll und Vaas die bewegte Kulturgeschichte dieser Halbwüste, die noch zahlreiche Rätsel aufgibt. Es ist das sachlich ergiebigste Kapitel des Buches.

Die Autoren verbinden die Regionalthemen mit kurzen Reisehinweisen und mit Internetadressen und Telefonnummern einschlägiger Institutionen. Ob Leser des Buches, das für einen Reiseführer zu wenig bebildert und kaum mit Karten ausgestattet ist, diese Nebeninformationen nutzen werden, mag man bezweifeln.

Die Frage nach dem astronomischen Wissen der Indianer führt den Leser auf ein anderes wichtiges Forschungsthema hin. Doch ist die Sicht der Autoren hier etwas eingeengt, indem sie Baureste, Steinritzungen und Ähnliches astronomisch deuten, ohne konkurrierende Deutungen ernsthaft in Betracht zu ziehen. Runde Steinkreise der nordamerikanischen Prärien kann man ganz einfach und mit ethnographischen Analogien operierend als Reste vorübergehender Kreisrituale anlässlich von Stammesfesten deuten. Und die Scharrbilder von Nazca werden von kompetenten Archäologen ebenfalls mit besseren Argumenten als den astronomischen als Wasserritualbauten interpretiert. Indem sich die Autoren bei der Suche nach astronomischem Wissen alter Kulturen auf die Deutung ortsfester materieller Hinterlassenschaften beschränken, enthalten sie dem Leser die großen mathematischen und astronomischen Leistungen vor, die Maya und Mixteken in Bild- und Schrifttexten niedergelegt haben. So handeln sie das an sich ergiebige und bedeutende Thema „astronomisches Wissen der Indianer" ungeschickt und wenig überzeugend ab.

Das Buch ist gut recherchiert und angemessen, wenn auch etwas unübersichtlich mit Literaturhinweisen versehen. Einige wenige terminologische Entgleisungen, wie „autark" anstatt „autonom", die Gleichsetzung von „Nomaden" mit „Jägern und Sammlern" und die weder geografisch noch kulturhistorisch zutreffende Bestimmung von „Mittelamerika", wo es „Mesoamerika" hätte heißen müssen, werden nur dem Spezialisten auffallen.

Berthold Riese

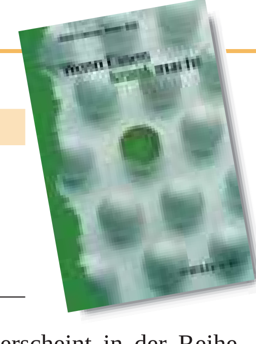
Der Rezensent ist Professor für Völkerkunde am Institut für Altamerikanistik und Ethnologie der Universität Bonn.

ERNÄHRUNG

John Emsley und Peter Fell

Wenn Essen krank macht

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer.
Wiley-VCH, Weinheim 2000. 262 Seiten, DM 48,–



Viele Menschen sind allergisch gegen diese oder jene Substanz, die – natürlicherweise oder hinzugefügt – in jedem Essen vorkommt, vielleicht sogar zu den Nährstoffen zählt. Oder sie vertragen sie einfach nicht, weil ihr Körper sie nicht schnell genug abbauen kann. Zu den Problemstoffen gehören Natriumglutamat, Alkohol, biogene Amine, Salicylate, sogar Coffein und seine Verwandten, Schwefeldioxid und die vielen natürlichen Toxine, die von Mikroorganismen erzeugt werden.

Der englische Chemiker John Emsley und Peter Fell, Mediziner und Direktor des Allergiezentrums Oxford, bieten dem Leser eine Tour d'Horizon zu diesem Thema. Sie ergänzen den Griff in ihren wohlgefüllten Zettelkasten mit zwei kurzen Kapiteln zu Zusatzstoffen und Verunreinigungen sowie zur gesunden Ernährung.

Den journalistisch aufbereiteten Fließtext ergänzt ein Anhang „Kleiner Leitfaden der Ernährung“. Hier findet sich der Stand der offiziellen britischen Lehrmeinung zur optimalen Versorgung mit Eiweiß, Kohlenhydraten, Fetten, Mineralstoffen (von Calcium bis Phosphat), Vitaminen und Spurenelementen und Ballaststoffen. Ein zweiter Anhang dokumentiert in Tabellen den Tyramin- und Salicylatgehalt (warum nur diese?) verschiedener Lebensmittel, und ein Glossar erläutert knapp siebzig teilweise wahllos ausgewählte Begriffe. Das Literaturverzeichnis ist um aktuelle deutschsprachige Bücher ergänzt, die – mit einigen zaghaften Ausnahmen – etablierte Lehrmeinungen beziehungsweise die Auffassung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung repräsentieren. Das Sachregister berücksichtigt leider nicht die zahlreichen Tabellen und führt deswegen oft nicht weiter, obwohl Informationen zum gesuchten Begriff im Buch stehen.

Warum ziert ein aufgeschlagenes Ei mit grünem Dotter das Titelbild? Die Frage ist am Ende des Buches immer noch offen. Vielleicht ließe sich über den auf Seite 172 zitierten Joe Eggers (der über Lebensmittelfarbstoffe und Hyperaktivität geforscht hat) am ehesten eine Verbindung zum Ei konstruieren.

Die Autoren beschreiben und erklären aus der Sicht des Wissenschaftlers, was man als Mensch beim Essen erleben kann (das Buch erscheint in der Reihe „Erlebnis Wissenschaft“). Der Grundtenor dabei: „Eine Vielzahl … Bücher warnt uns vor Gefahren, die angeblich von unserer Nahrung ausgehen. Die Auswirkungen vieler Zusätze, beispielsweise von Pestizidrückständen … oder Additiven … werden häufig stark übertrieben.“ Vor diesem Hintergrund arbeiten Emsley und Fell die Palette möglicher „Chemikalien“ ab und versprechen, keinen Ratschlag zu geben, „der nicht durch medizinische oder naturwissenschaftliche Tatsachen untermauert werden kann“.

Ist das Aufgetischte geprüft, mag Essen wieder zu einem - angstfrei genießbaren - Erlebnis werden

Zu den Folgen des Ess-Erlebnisses zählen Migräne, Schwindelgefühle, Erbrechen, Herzattacken, Hautausschläge und Asthma. Fallgeschichten wie „Rosemaries Mahlzeit in einem Bio-Restaurant“ mit nachfolgendem Durchfall, heftigen und kolikartigen Bauchschmerzen und pochendem Kopfschmerz werden in liebevoller Ausführlichkeit in Kästen erzählt, damit der Leser daraus lernen kann, wie einfach solche Körperreaktionen zu verstehen und zu vermeiden sind. Nach zwölf Stunden hatte Rosemarie die Folgen einer Aminunverträglichkeit nachwirkungsfrei überstanden. Dem Konzept „Lernen am Beispiel“ dienen auch Speisekarten (grafisch einfallslos präsentiert) sowie Tabellen mit Mengenangaben zu kritischen Stoffen und mit einigen in Deutschland eher unüblichen Gefahrenquellen wie Boursault (ein bei uns nicht einmal lexikonwürdiger französischer Weichkäse) und Stilton (ein Blauschimmelkäse) sowie eigenartige Menüvorschläge wie Obstsalat als Vorspeise.

Bei diesen Geschichten und den wissenschaftlichen Erläuterungen oszilliert das Niveau des Textes in weiten Ausschlägen von trivial („Das Rohr, dessen Enden Mund und After bilden, heißt Magen-Darm- oder Verdauungstrakt“) bis oberflächlich vordiplomchemisch: „Biogene Amine … werden mit Hilfe spezifischer Enzyme aus Aminosäuren gebildet, indem die Säuregruppe (Carboxylgruppe) abgespalten wird.“ Hier wie überall vermisst der Leser die Visualisierung der Vorgänge, gleichgültig, ob es sich um den Abbau der Aminosäuren zur Carbonsäure handelt oder um die Formeln für Aspirin oder Salicylsäure.

Die Übersetzung kommt mit wenigen Ausnahmen flüssig und flott daher; lediglich der Begriff „Chemikalien“ (das sind industriell hergestellte Stoffe) für körpereigene Substanzen führt an einigen Stellen zur Verwirrung. Auch bleibt dem unbedarften Leser unklar, warum sich polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe „PAH“ abkürzen und warum „MSG“ für Mononatriumglutamat steht.

Wer kritische Stimmen zu unseren Lebensmitteln und ihren Inhaltsstoffen sucht, wird mit diesem Buch nicht bedient: „Das P450-System und ähnliche sind flexibel genug, um nahezu jedes unerwünschte Molekül, ob natürlich oder künstlich, zu zerstören.“ Mit dieser Noproblem-Einstellung, die sich durch alle Seiten zieht, können die Autoren leicht den „Genuss an wohlschmeckenden Speisen und köstlichen Getränken erhalten oder zurückgeben“.

Immerhin bieten sie viele Informationen, die der Chemiker beim Stammtisch und der Oberstudienrat während der Toskana-Pauschalreise braucht, um sich schnell, sicher und kompetent in Szene zu setzen. Zusätzlich gibt es viele Hinweise, wie jeder das Aufgetischte auf mögliche Problemstoffe prüfen und sich darauf einstellen kann. So mag Essen wieder zum – angstfrei genießbaren – Erlebnis werden.

Ernst Guggolz

Der Rezensent ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in Mannheim.

Das Ende von Eric Weissteins mathematischer Schatzkiste

Eine der populärsten unter den Websites mit wissenschaftlichem Inhalt existiert zur Zeit nur als Traueranzeige. Auf http://mathworld.wolfram.com informiert Wolfram Research Inc. seine Besucher, dass Eric Weissteins „MathWorld" auf Grund einer gerichtlichen Verfügung nicht allgemein zugänglich gemacht werden darf.

Dies ist der derzeitige Stand einer Geschichte, die ohne das Internet undenkbar wäre und selbst für dessen Verhältnisse außergewöhnlich ist. Eric Weisstein, von seiner Ausbildung her eigentlich Astronom, hatte seit Studienzeiten gewohnheitsmäßig alle Mathematik, die ihm über den Weg lief, in kurzen Notizen zusammengefasst. Mit dem Aufkommen des World Wide Web verwandelte er seine Aufzeichnungen in eine Sammlung von Artikeln zu einzelnen Stichwörtern und stellte sie, versehen mit einem dichten Netz von Querverweisen, ins Internet. Sie wuchs ständig, auch durch E-Mail-Beiträge zahlreicher Nutzer, und wurde sehr bald zur meistgefragten mathematischen Website überhaupt.

Über die Jahre hat Weisstein eine unglaubliche Menge an Stoff zusammengetragen. Durch einen einfachen Test ist das mühelos nachzuprüfen: Man frage eine Suchmaschine nach einem beliebigen mathematischen Begriff (in englischer Sprache); ich wette, unter den ersten zehn Verweisen ist einer auf Weisstein, und häufig ist es der einzig brauchbare.

Ein Lexikon für Gardner-Fans

Auswahl und Umfang der Beiträge sind stark von Weissteins persönlichem Geschmack geprägt: Über die Zahl π bringt er das Äquivalent von mehr als zehn Druckseiten, er rechnet uns die Fouriertransformation mehrerer spezieller Funktionen auf ebenfalls mehreren Seiten detailliert vor, und er hat einen starken Hang zur Unterhaltungsmathematik. Dabei sieht er sich in der Tradition von Martin Gardners legendären „Mathematical Games" aus dem „Scientific American". So finden sich die Polyominos (verallgemeinerte Dominosteine), die Golomb-Lineale und andere Klassiker wieder, und immer wieder stößt man auf die ausgefallensten Polyeder (Vielflächner) mit Bild und griechischem Bandwurmnamen. Dagegen sind zum Beispiel Grundbegriffe von Funktionalanalysis und Integrationstheorie knapp bis lieblos und häufig fehlerhaft abgehandelt.

Seit 1999 liegt sein Werk in gedruckter Form vor, als „CRC Concise Encyclopedia of Mathematics". Und das war der Anfang vom – vorläufigen – Ende der Website. Mittlerweile streitet man sich vor Gericht, ob Weisstein dem Verlag CRC mit dem Copyright an der gedruckten Ausgabe auch das Recht an der weitaus älteren und weiter wachsenden Website verkauft hat.

Weisstein ist mittlerweile Angestellter von Wolfram Research Inc., dem Hersteller der mathematischen Universalsoftware „Mathematica" (Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 100). Nach einigem Hin und Her hinter den Kulissen stellte Wolfram Weissteins Material, das dieser inzwischen weiterentwickelt hatte, unter dem Namen „MathWorld" ins Netz und fing sich damit eine Urheberrechtsklage von CRC ein. Der Fall ist in der Hauptsache noch nicht entschieden – man verhandelt über einen Vergleich; aber die Begründung der am 23. Oktober 2000 ergangenen einstweiligen Verfügung zur Schließung der Website lässt Schlimmes befürchten.

Niemand bestreitet, dass die Website zuerst da war und das gedruckte Werk von dieser abgeleitet ist. Aber, so das zuständige Bezirksgericht, ein eigenständiges Copyright für ein abgeleitetes Werk („derivative work") entsteht erst dadurch, dass sich dieses durch Zusätze oder herausgeberische Bemühungen irgendwelcher Art wesentlich („substantially") vom Original unterscheidet. Also ist die Website rechtlich dasselbe wie das gedruckte Werk, und das Copyright, das Weisstein an CRC abgetreten hat, erstreckt sich, dem Wortlaut des Vertrages und jedem vernünftigen Denken zuwider, auch auf sein Lebenswerk, die Website.

Juristische Purzelbäume

Bei der Güterabwägung über die Folgen seiner Verfügung bewertete das Gericht den Schaden für CRC durch entgehende Einnahmen aus Verkäufen höher als den Schaden, der Wolfram durch die Sperrung der Website entsteht; denn Wolfram nimmt ja kein Geld für die Website! Und der Nachteil für die Öffentlichkeit dadurch, dass sie nicht mehr kostenlos auf Weissteins Werke zugreifen könne, werde weit überwogen durch den Schaden, welcher der Öffentlichkeit durch eine Aufweichung der Urheberrechtsprinzipien entstünde. Immerhin sei jedermann frei, sich die Informationen via Buch oder CD-Rom für 99 Dollar zu beschaffen.

Unabhängig von den Einzelheiten dieses Rechtsstreits (die man über einen Link in http://mathworld.wolfram.com nachlesen kann) glaube ich: Das Motiv, die Welt mit den Ergebnissen der eigenen Arbeit zu beglücken, ohne von der Welt dafür mehr zu verlangen als den Ruhm und – hoffentlich – einen öffentlich oder privat gesponserten Arbeitsvertrag, ist legitim und rechtlich nicht geringer zu bewerten als ein finanzielles Interesse. Die wissenschaftliche Welt arbeitet seit jeher nach diesem Prinzip. Es ist kurzsichtig und auf die Dauer kontraproduktiv, wenn die kommerziellen Verlage sich dagegen zu stemmen versuchen, nur weil das Weltbeglücken technisch so viel einfacher geworden ist.

Christoph Pöppe



Wissenschaft im Unternehmen, S.110, Ausgabe 6/2001 fehlt



Die wendige Katze

Sie fällt immer auf die Füße – auch wenn sie wenig Zeit hat, die richtige Haltung einzunehmen. Wie bringt sie dieses Kunststück fertig?

VON WOLFGANG BÜRGER

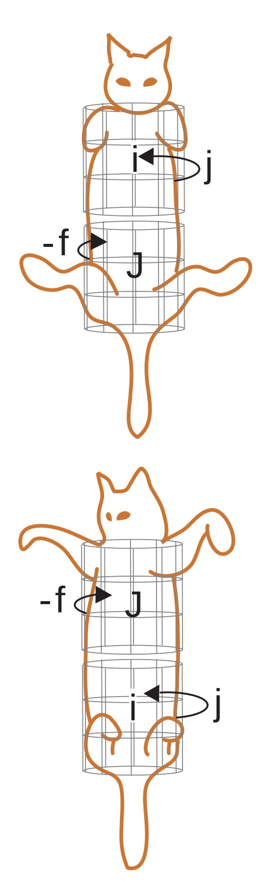
GRAFIK: AXEL WEIGEND

Sicherheitsmanöver: Hält man eine Katze an allen vier Beinen hoch und entlässt sie mit dem Rücken voran, dreht sie sich in weniger als einer halben Sekunde halb um die eigene Achse und federt den Aufprall auf den Boden mit langen Beinen ab. Man glaubt zu sehen, dass sich ihr Körper im ersten Augenblick des Falles noch nicht und nach der 180-Grad-Drehung bis zum Aufsetzen auf den festen Grund nicht mehr dreht.

Die Katze muss schnell sein, denn nach einer halben Sekunde beträgt die Geschwindigkeit ihres Schwerpunkts schon 18 Stundenkilometer. Während die Fallgeschwindigkeit „nur“ proportional zur Zeit wächst, nimmt die Bewegungsenergie der Katze und damit ihr Risiko, sich bei einer unglücklichen Landung auf dem Boden zu verletzen, viel schneller zu.

Was in dieser kurzen Zeit abläuft, zieht so schnell am Auge vorüber, dass sich beim bloßen Zuschauen nicht alle Einzelheiten erkennen lassen. Nach Berichten von Biologen ist nicht nur Katzen, sondern auch Hasen, Hunden, Kaninchen und Affen der Instinkt angeboren, sich beim Fallen auf die Füße zu drehen. Ich habe es nicht nachgeprüft und möchte die Leser nicht zu voreiligen Experimenten verleiten.

Ein öffentlicher Aufruf: Seit Generationen haben Menschen den Katzen bei ihrem Manöver zugeschaut, aber erst im Jahre 1894 wurde es ein „wissenschaftliches Problem“. Die Pariser Akademie der Wissenschaften rief öffentlich auf, „eine physikalische Erklärung zu geben, wie es eine Katze fertig bringe, beim Fallen aus größerer Höhe stets mit den Füßen voran auf den Boden zu kommen“. Die Vertreter der Mechanik in der Akademie waren der Ansicht, die Drehung lasse sich nur damit erklären, dass die Katze sich im Augenblick des Loslassens von den Händen abstoße und dabei Drehimpuls in der einen oder anderen Richtung gewinne. Denn während des Falles selbst könne die Katze einen Teil ihres Körpers nur dadurch drehen, dass sie gleichzeitig einen anderen Teil im entgegengesetzten Sinne bewege, sodass die zugehörigen Drehimpulse sich gegenseitig aufhöben. Der Gesamtdrehimpuls bleibt ja erhalten, und wenn er anfangs gleich null war, kann keiner aus dem Nichts entstehen. Um also bei der Landung die Vorder- und die Hinterbeine gleichzeitig auf den Boden zu bringen, könne sie allenfalls ihren Körper um eine ganze Windung verschrauben – was erfahrungsgemäß nicht der Fall ist.





Die Drehbewegung der Katze im Fall

Die Kunst, auf die Füße zu fallen

Zweitakt-Drehung: Der Körper der Katze bleibt gestreckt. Im ersten Takt legt sie ihre Vorderbeine dicht an die Körperachse und spreizt ihre Hinterbeine zur Seite. Dann haben die vordere und die hintere Körperhälfte unterschiedlich große axiale Trägheitsmomente i und J, wobei i deutlich kleiner ist als J. Gehen wir davon aus, dass i und J während eines Taktes konstant bleiben. Dreht sich die vordere Hälfte um den Winkel φ in der einen Richtung, so die hintere um den Winkel Φ in der Gegenrichtung. Die beiden Drehimpulse heben sich voraussetzungsgemäß auf, deshalb ist in jedem Augenblick $i\varphi = J\Phi$. Im zweiten Takt erfolgt die gleiche Drehung mit vertauschten Rollen. Im Endergebnis haben sich beide Körperhälften um den Differenzwinkel $\varphi - \Phi = (1 - i/J)\varphi$ gedreht. Wenn φ groß genug ist und die Katze das Verhältnis i/J der Trägheitsmomente klein genug macht, kann es ihr gelingen, sich auf einmal um 180 Grad zu drehen. In Wirklichkeit besteht die Katze natürlich nicht aus zwei starren Hälften, sondern verwindet sich stetig vom Kopf bis zum Schwanz.

Kreiseldrehung: Wir modellieren Vorder- und Hinterkörper der Katze durch zwei gleiche zylindrische Rotoren, deren Achsen gegen die Horizontale um den Winkel $\pm\alpha$ geneigt und miteinander durch eine Art Kardangelenk verbunden sind – eine etwas eckige Approximation einer Katze mit gekrümmtem Rückgrat. Beide Rotoren drehen sich mit gleicher Winkelgeschwindigkeit ω um ihre jeweilige Achse. Die

Aber die Abstoß-Hypothese wurde durch sorgfältige Versuche, bei denen man die Beine der Katze vor dem Fall einzeln an Schnüren aufhängte, widerlegt. Es lässt sich schnell abschätzen, dass auch aus dem Austausch von Drehimpuls mit der Umgebungsluft nicht genug zu gewinnen ist: Selbst wenn die Katze mit allen ihren Gliedern heftig durch die Luft rudert, können aerodynamische Auftriebs- und Widerstandskräfte der Drehung nicht den nötigen Schwung geben.

Viele Fragen: Bis heute hält sich hartnäckig das Vorurteil, die Katze treibe die Drehung um ihre Längsachse an, indem sie mit dem Schwanz kräftig entgegenrudere. Von vornherein abwegig ist es nicht; Katzen benutzen zu Ausgleichsbewegungen auch ihren Schwanz. Aber in diesem Fall müsste selbst ein stattlicher Schwanz schnell wie ein Propeller rotieren. Experimente mit schwanzlosen Katzen zeigen, dass sie sich fast ebenso elegant drehen können wie geschwänzte.

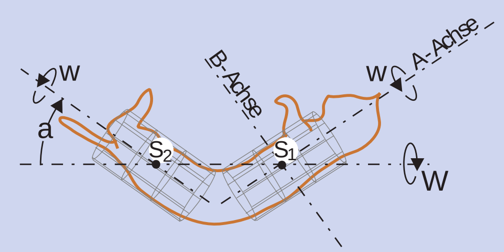
Wären alle physikalischen Fragen beantwortet, blieben noch die physiologischen Fragen nach dem Antrieb und der Steuerung der Bewegung. Biologen ließen Katzen mit verbundenen Augen oder in dunkle Räume fallen, deren Höhe die Tiere nicht vorhersehen konnten. Gleichwohl gelang es gesunden Katzen immer, die Füße auf den Boden zu bekommen. Sie verloren diese Fähigkeit erst, wenn ihnen beidseitig die Labyrinthe des Innenohrs mit den Gleichgewichtsorganen operativ entfernt wurden.

Hochgeschwindigkeits-Fotografie: Noch im gleichen Jahr, 1894, legte Étienne Jules Marey der Akademie der Wissenschaften in Paris zwei Bildfolgen einer fallenden Katze aus verschiedenen Perspektiven vor. Sie geben eine raum-zeitliche Vorstellung davon, wie Katzen sich umdrehen, indem sie Teile ihres Körpers gegensinnig bewegen. Marey, ein Pionier der Kinematografie in der Biologie, hatte um 1890 eine Kamera erfunden, die sechzig Bilder in der Sekunde aufnehmen konnte, und sie schon erfolgreich auf den Vogelflug angewendet. Wenn er die Bildfolge mit einem „Zootrop“ sechsfach verlangsamt „in Zeitlupe“ vorführte, wurde sie vom Auge eben noch als stetiger Ablauf oder „Film“ wahrgenommen.

Die Vorführung des Films löste in der Akademie einen Sturm aus. Einige der anwesenden Physiker zweifelten an, was sie sahen, weil es grundsätzlich unmöglich sei, dass ein fallender Körper von sich aus in Drehung kommen könne.

Drehung im Zweitakt: Marey entnahm den Bildern, dass seine Katze sich in zwei Takten drehte. Im ersten Takt stellte sie ihre Hinterbeine quer zur Körperachse (wodurch sie für die axiale Drehung das Trägheitsmoment der hinteren Körperhälfte vergrößerte), während sie gleichzeitig die Vorderbeine möglichst nahe zur Achse zog (und das axiale Trägheitsmoment der vorderen Körperhälfte so klein wie möglich machte). Wenn die Katze nun ihre vordere Hälfte so weit wie möglich in die eine Richtung drehte, drehte sich die hintere Hälfte zwangsläufig entgegengesetzt, aber im umgekehrten Verhältnis der Trägheitsmomente langsamer. Im zweiten Takt stellte die Katze die Vorderbeine quer und streckte die Hinterbeine lang, damit sich der hintere Teil um den größeren Winkel drehte. Im Endergebnis hatten sich beide Hälften im gleichen Sinn um etwa den gleichen Differenzwinkel gedreht.

Die Aktion der Akademie machte das Katzenproblem so populär, dass es alsbald in der Lehrbuch-Literatur erschien und die Physiker anregte, über momentenfreie Drehungen von Mensch und Tier im Raum nachzudenken. Seit mehreren Jahrzehnten ist das Thema durch aktuelle Anwendungen im Sport (Turmspringen), in der Zirkus-Akrobatik (Schleuderbrett, Trapez) und in der Weltraumfahrt wieder populär geworden.



vertikalen Anteile der Drehimpulse, von der Größe $\pm A\omega \sin\alpha$ (A ist das axiale Trägheitsmoment eines Rotors), sind entgegengesetzt gleich und heben sich daher auf. Die horizontalen Anteile, jeder von der Größe $A\omega\cos\alpha$, addieren sich zu einer Drehung um die Achse durch die Schwerpunkte S_1 und S_2 der beiden Rotoren. Da die Katze nach Voraussetzung den Gesamtdrehimpuls null hat, wird der Drehimpuls der Rotoren durch eine Rückdrehung des Körpers mit passender Winkelgeschwindigkeit Ω kompensiert. Jeder der beiden Rotoren hat bei Drehung um die Achse durch ihre Schwerpunkte das Trägheitsmoment $A\cos^2\alpha + B\sin^2\alpha$, wobei B sein Trägheitsmoment um die Querachse ist. Nach einer gewissen Zeit t haben sich die Rotoren um den Winkel $\varphi = \omega t$ und – kompensierend – die ganze Katze um den Winkel $\Phi = \Omega t$ gedreht. φ und Φ stehen im gleichen Verhältnis wie die Winkelgeschwindigkeiten ω und Ω und diese, bis aufs Vorzeichen, im umgekehrten Verhältnis wie die Trägheitsmomente. Die effektive Drehung der Katze erfolgt daher um den Differenzwinkel

$$\varphi - \Phi = \varphi\left(1 - \frac{A\cos\alpha}{A\cos^2\alpha + B\sin^2\alpha}\right).$$

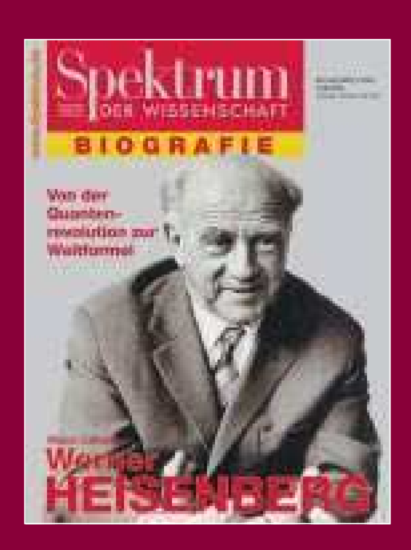
Eine gestreckte Katze ($\alpha = 0$) kann sich auf diese Weise nicht drehen ($\varphi = \Phi$). Die Katze mit gekrümmtem Rücken ($\alpha > 0$) dreht sich umso rascher, je größer der Winkel α ist. Für die taschenmesserartig zusammengeklappte Katze ($\alpha = \pi/2$) tritt keine Rückdrehung auf ($\Phi = 0$).



BORN, UNIVERSITÄT DUISBURG

WERNER HEISENBERG

Die Sonderheftreihe „Biografie“ erscheint vierteljährlich und ist im Abonnement zum Jahresbezugspreis von DM 55,20 (ermäßigt DM 48,–) erhältlich. 2001 erscheinen weitere Biografien über René Descartes und Wernher von Braun.



WERNER HEISENBERG hat die Physik des 20. Jahrhunderts geprägt wie vor ihm vielleicht nur noch Albert Einstein und Niels Bohr. Mit knapp 27 Jahren war er nicht nur der jüngste Professor für Physik in Deutschland, sondern entscheidender Vollender der Quantenmechanik und Entdecker der viel diskutierten Unschärferelation. Im Jahr 1933 empfing er bereits den Nobelpreis für Physik. Heisenberg zählt auch zu den Pionieren der Quantenfeldtheorie und Kernphysik, wo er mit seinen stets originellen und wagemutigen Ideen wichtige Impulse gab. Seine Gewissensnöte als Physiker im Dritten Reich gipfelten im geheimnisumwitterten Treffen mit seinem Lehrer Niels Bohr 1941 im besetzten Kopenhagen. Nach dem Krieg bemühte sich Heisenberg erfolgreich um den Wiederaufbau der deutschen Forschung, scheiterte aber bei der Suche nach der „Weltformel“.

Die Katze als Kreisel: Katzen beherrschen noch andere Tricks, auf die Füße zu kommen. In einer Fotoserie des Magazins „Life“, die T. R. Kane & M. P. Scher 1969 ihrer Analyse zugrunde legten, war am Versuchstier während des Falles keine Verwindung des Körpers zu erkennen; dafür winkelte die Katze ihr Rückgrat in der Hüfte ab. In ihrem mathematischen Modell beschrieben die Autoren daraufhin die Katze durch zwei sich mit gleicher Winkelgeschwindigkeit drehende Rotoren, deren Drehachsen einen Winkel einschließen. Wäre das Rückgrat gerade, die Achsen also in einer Linie, könnte die Katze auf diese Weise ohne ein äußeres Drehmoment in der Tat nicht in Drehung kommen.

Man stelle sich den anderen Extremfall vor: Die Katze könnte ihren Körper wie ein Taschenmesser zusammenklappen. Sie klappt sich dann zu Beginn des Falles Bauchseite an Bauchseite zusammen, rotiert ihre beiden Hälften gegeneinander um eine halbe Drehung, bis sie Rücken an Rücken liegen, klappt sich auf und hat die Füße zuunterst. Wenn die beiden Körperhälften auch noch gleiche Trägheitsmomente haben, heben sich ihre Drehimpulse genau auf.

Der Normalfall liegt zwischen den beiden Extremen, sodass die Drehimpulse sich nicht ganz ausgleichen. Zur Kompensation des restlichen Drehimpulses entsteht dann eine Gegendrehung des Katzenkörpers, die der Präzession eines Kreisels ähnelt (siehe Kasten). Falls die Katze drehungsfrei losgelassen wird, beginnt ihre Drehung in dem Moment, in dem sie ihre Rotoren in Gang setzt, und endet ebenso plötzlich, sobald sie die Rotoren wieder stoppt.

Mit Sicherheit verfügen echte Katzen über ein größeres Repertoire von Methoden, sich momentenfrei zu drehen, da sie außer Teilen ihres Rumpfes den Kopf, vier Beine und den Schwanz weitgehend unabhängig voneinander bewegen können. Gern wüsste man außerdem, wie die Katze die Drehung steuert und durch Kontraktion ihrer Muskeln antreibt, aber das ist kein Problem der Physik. ■

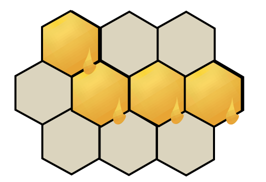
Literaturhinweise

A Dynamical Explanation of the Falling Cat Phenomenon. Von T. R. Kane und M. P. Scher in: International Journal of Solids Structures, Bd. 5, S. 663 (1969).

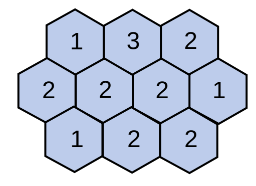
How does a falling cat turn over? Von D. A. McDonald in: The Saint Bartholomew’s Hospital Journal, Bd. 56, S. 254 (1955).

Die Honigwaben

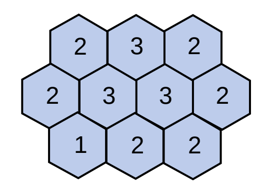
von Pierre Tougne



geöffnete Wabe



Codierung *A*



Codierung *B*

Nach Erfahrungen mit ihren naschhaften Sprösslingen will die Bienenkönigin in Zukunft ihre Honigvorräte sorgfältiger verwahren. Sie füllt einige Kammern einer Wabe, verschließt die ganze Wabe dann mit blauem Wachs und codiert sie nach zwei unterschiedlichen Verfahren (siehe oben).

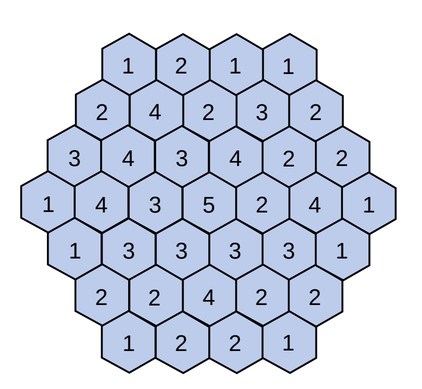
Bei der Codierung *A* ist jede Kammer mit der Anzahl der sie umgebenden gefüllten Kammern beschriftet; bei der Codierung *B* zählt die Kammer selbst mit (wenn sie Honig enthält).

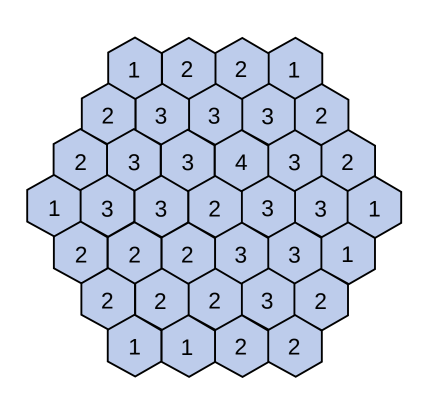
Die beiden Waben unten wurden jeweils nach einem dieser beiden Verfahren von der Königin codiert.

Welche Codierung wurde jeweils benutzt, und welche der Kammern müssen die Schleckermäuler öffnen, um Honig zu finden?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir sechs Uhrenbausätze „Clock-Kit". Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. Juni 2001, eingehen.





Lösung zu „Fair play" (April 2001)

Das Spiel ist nicht fair. Britta kann zu jeder von Achim genannten Kombination eine Sequenz wählen, die ihr eine höhere Gewinnchance verschafft.

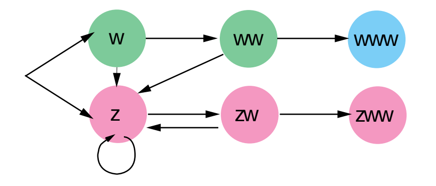
Wie kann das sein? Es sind doch alle Dreierfolgen von Wappen (w) oder Zahl (z) gleich wahrscheinlich. Schon richtig; nur kommen manche Dreierfolgen selten zur Geltung, weil die gegnerische Dreierfolge ihr zuvorkommt und damit das Spiel beendet.

Daher entsteht ein Spiel ähnlich dem Knobelspiel „Stein, Schere, Papier": Es gibt zwar keine optimale Kombination, aber zu jeder genannten eine bessere. Die Tabelle gibt zu jeder Folge Achims die für Britta optimale Folge und die Gewinnchance für Britta.



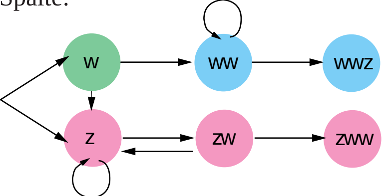
Achim	www	wwz	wzw	wzz	zzz	zzw	zwz	zww
Britta	zww	zww	wwz	wwz	wzz	wzz	zzw	zzw
Chance für Britta	7/8	3/4	2/3	2/3	7/8	3/4	2/3	2/3

Alle Abläufe und Wahrscheinlichkeiten hat Friedel Klein aus Wettenberg durch Spielgraphen ermittelt. Die Graphen beginnen mit dem ersten Wurf links und enden bei einer Gewinnsequenz. Jeder Pfeil bedeutet einen Münzwurf. Grün sind noch offene Spielstellungen, hellblau die, bei denen Achim, und rosa die, bei denen Britta bereits gewonnen hat. Der Spielgraph für die erste Spalte der Tabelle sieht so aus:



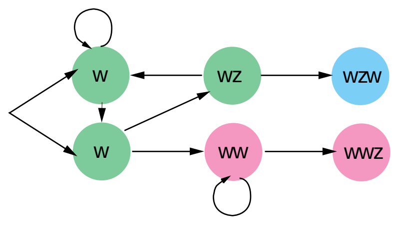
Achim kann hier nur gewinnen, wenn bereits am Anfang dreimal in Folge Wappen fällt. Sollte beim ersten, zweiten oder auch dritten Wurf Zahl kommen, ist Britta bereits auf der Siegerstraße, und dies ist in sieben von acht Fällen so.

Ähnlich beim Graphen der zweiten Spalte:



Nur wenn weder im ersten noch im zweiten Wurf Zahl fällt, ist Achim der Sieger. Das ist aber nur zu einer Wahrscheinlichkeit von 1/4 der Fall.

Unten der Graph von Spalte drei, der eine Gewinnwahrscheinlichkeit von 2/3 für Britta ergibt.



Die Gewinner der zehn CD-Roms „Bauen im Licht" sind Wolfram Weiß, Köln; Bernd Rümmler, Göttingen; Friedel Klein, Wettenberg; Michael Winckler, Mannheim; Heinz Klaus Strick, Leverkusen; Hartmut Fenner, Hamburg; Kathrin Gloystein, Hamburg; Ingo Schiermeyer, Herzogenrath; Johann Meier, Unterschleißheim; und Gabriele Penn-Karras, Berlin.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal Wissenschaft Online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik" jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Der Flugschreiber

Der Luftverkehr ist eine Wachstumsbranche, doch nur solange das wachsende Verkehrsaufkommen nicht auch mit immer häufigeren Unfällen einhergeht. Einen wesentlichen Anteil an den Sicherheitsvorkehrungen hat die Analyse der Aufzeichnungen von Flugschreibern, um die Absturzursache zu ermitteln: Voice Recorder nehmen alle Stimmen und Geräusche im Cockpit auf, Flugdatenschreiber protokollieren Uhrzeit, Flughöhe, Kurs sowie bis zu 350 weitere Instrumentendaten. Diese Geräte müssen so robust gebaut sein, dass sie nahezu jeden Crash überstehen. Internationalen Bestimmungen der Luftfahrtbehörden gemäß führen alle Verkehrsflugzeuge ab 10 Passagieren und 14 Tonnen Gewicht solche Flugschreiber mit. Allein in den vergangenen vier Jahrzehnten haben Techniker 100000 in gewerblich genutzten Flugzeugen installiert.

Die ersten Flugschreiber der fünfziger Jahre waren „schwarze, gekapselte Metallkästen“ – aus dieser Zeit stammt die Bezeichnung „Black Box“, der sich bis heute gehalten hat, obwohl längst ein auffälliger orangefarbener Anstrich Vorschrift ist.

Außer Elektronikplatinen für Aufbereitung und Umwandlung der Flugdaten in speicherfähige Informationen enthält die 10000 bis 20000 US-Dollar teure Black Box einen Datenspeicher. Die ersten Geräte schrieben magnetische Markierungen auf ein aufrollbares Stahlband. Erst 1965 setzten die Fluggesellschaften Magnetbänder ein, zunächst nur für Voice Recorder. Modernere Geräte arbeiten auf Basis digitaler Tonbandtechnik. Diese Digital Flight Recorder sind heute noch in der B-747, im A-310 und MD-80 im Einsatz. Erst seit Anfang der neunziger Jahre setzten sich mehr und mehr Flugschreiber mit Flash-Memory-Speichern durch, wie sie im A-320 oder MD-11 zu finden sind. Während sich die Bandaufzeichnungsgeräte anfällig für Brände zeigten, wurden die neuartigen Festspeichergeräte bislang noch nie bei einem Flugzeug-Crash zerstört.

Flash-memory-Chips fassen bis zu 80 Megabyte Daten und halten sie ohne Stromversorgung über Jahre hinweg. Durch Komprimierung der Daten gelingt es so, im Endlosverfahren mindestens 30 Minuten bis zu 2 Stunden Sprachaufzeichnung sowie bis zu 25 Stunden Flugdaten zu speichern, angefangen von der Position des Flugzeuges über den Zustand von Fahrwerk, Landeklappen und Rudern bis hin zu den Triebwerkdaten (Leistung, Temperatur).

Der Unterwasser-Signalgeber ist fest mit der crash-sicheren Einheit verbunden. Er wird automatisch beim Eintauchen in Wasser aktiviert. Die Schallsignale – die wie „Ping“ klingen und dem Gerät so die englische Bezeichnung Pinger einbrachten – könnten aus einer Tiefe bis zu 5000 Meter geortet werden.

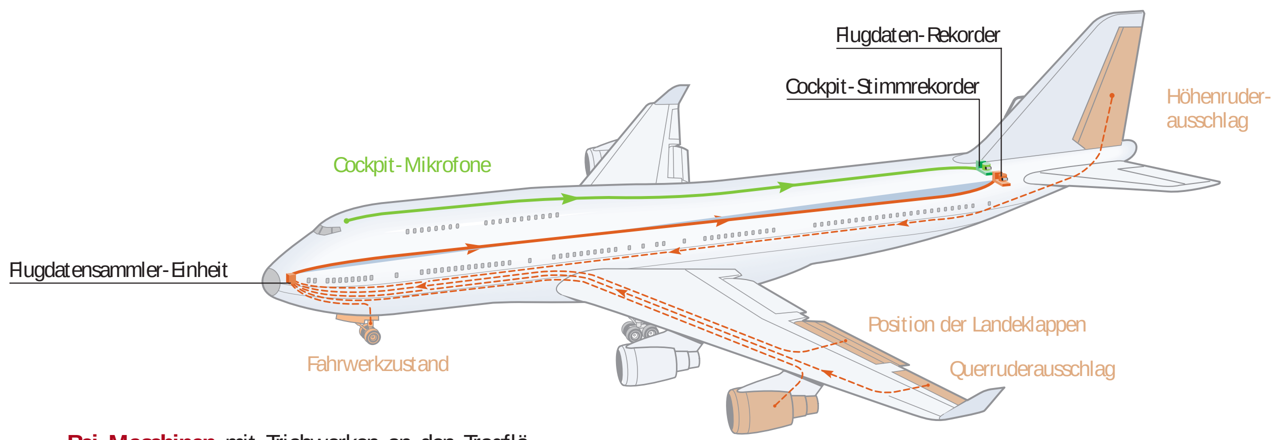
Obschon die Apparate im Laufe der Zeit ständig weiterentwickelt wurden und immer mehr Instrumentendaten festhalten, streben die Luftfahrtbehörden weltweit weitere Verbesserungen an. So will die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA ab 2005 alle Boxen mit einer Eigenstromversorgung ausrüsten. Auch die Übertragung wichtiger Flugdaten eines in Not geratenen Flugzeuges per Satellitenverbindung wird erwogen. In Zukunft will man sogar eine Videokamera im Cockpit installieren und Bewegungsabläufe, Bedienung des Flugzeuges und die Handgriffe der Piloten aufzeichnen; dagegen erheben Pilotenverbände starke Einwände. ■



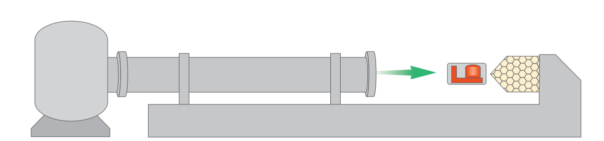
ZEICHNUNGEN: GEORGE RETSECK; QUELLE: FAIRCHILD AVIATION RECORDERS

Moderne Festspeicher-Rekorder, die keine beweglichen Teile mehr enthalten, sind wesentlich robuster als ihre teilweise mechanischen Vorgänger. Bei dem hier dargestellten Modell sind die Speicherkarten im Zentrum eines crash-sicheren Zylinders angeordnet. Damit die Chips Gewalt- und Hitzeeinwirkungen schadlos überstehen, ist die Box von einer starken, mehrlagigen Edelstahlarmierung umschlossen, die auch eine Hitzeummantelung enthält; langsam schmelzende Kunststoffe wirken dabei innerhalb der Stahlarmierung als Energiefresser.

Der Autor ***Mark Alpert*** *ist Redakteur bei Scientific American.*

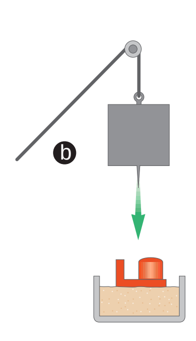


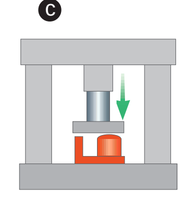
Bei Maschinen mit Triebwerken an den Tragflächen wie hier im Bild müssen die Rekorder im Heck platziert sein, denn die Wahrscheinlichkeit einer Zerstörung beim Absturz ist dort am geringsten. Befinden sich die Triebwerke am Rumpf, werden sie vor den Aggregaten angebracht, damit wegfliegende Triebwerkteile sie nicht treffen.

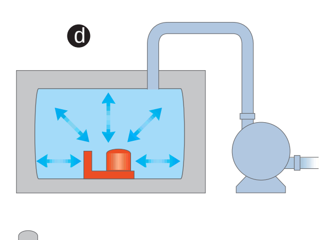


Die Erprobung von Flugschreibern zählt neben den Sicherheitsprüfungen für Castor-Brennelementbehälter zu den härtesten Belastungstests weltweit – und das gleich in mehrfacher Hinsicht:

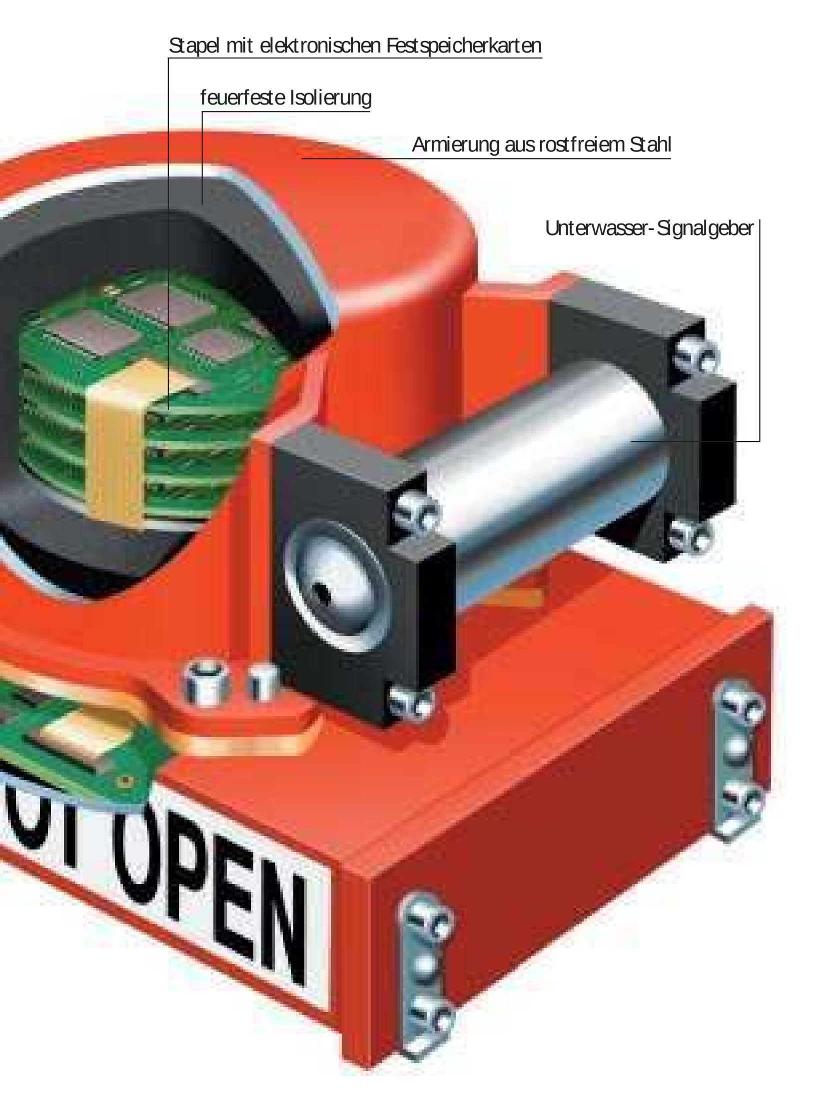
Beim Crash-Impact-Test wird der Flugschreiber mit einer Gas-Kanone *(a)* auf eine feststehende Aluminiumplatte geschossen. Tonband-Rekorder müssen dabei Verzögerungskräfte von 2000 g beziehungsweise einen Aufschlag mit 250 Stundenkilometer überstehen, für Chip-Rekorder sind bis zu dem 3400fachen der Erdbeschleunigung beziehungsweise etwa 425 Stundenkilometer gefordert; künftige Normen werden sogar 5000 g verlangen. In einem weiteren Zerstörungsversuch muss die Black Box einem gehärteten Stahlsporn *(b)* widerstehen, der mit einer Gewichtskraft von 250 Kilogramm aus drei Metern Höhe auf sie herabfällt. Ein statischer Test *(c)* mit 2500 Kilogramm Gewicht folgt. 24-stündige Druckkammertests *(d)* simulieren unter anderem Bedingungen, wie sie am Meeresboden anzutreffen sind – immerhin müssen die Geräte, die nach dem Absturz Sonarsignale ausstrahlen, noch 30 Tage aus einer Wassertiefe von 6000 Metern zu orten sein. Erst wenn auch die Flammenhölle *(e)* von 1100 Grad Celsius schadlos überstanden wurde, kann das Modell zum Einsatz in der Luftfahrt freigegeben werden.







e



Stürmisches Weltraumwetter

Die Sonne schleudert gelegentlich Schwaden geladener Teilchen in Richtung Erde. Dort erzeugen die Partikel faszinierend schöne Polarlichter – bedrohen aber auch Satelliten wie Astronauten und können sogar die Stromversorgung zusammenbrechen lassen.



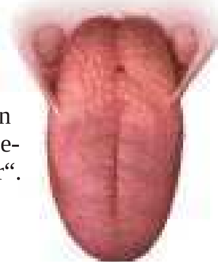
Virtuell anwesend

Unzufrieden mit herkömmlichen Videokonferenzen? Tele-Immersion, ein neues Kommunikationsmedium, bringt weit entfernte Gesprächspartner als täuschend echte Kopien in einem Raum zusammen.



Wie die Zunge schmeckt

Beim Schmecken arbeiten die Sinneszellen auf der Zunge komplizierter und ganz anders zusammen als lange angenommen. Auch im Gehirn entstehen „Geschmacksmuster“.



Die Übertragbarkeit von BSE

Warum konnte BSE überhaupt auf den Menschen überspringen? Worin bestand die „Artenbarriere“? Forscher suchen nach Antworten in den Prionproteinen von Mensch und Rind.



Weitere Themen im Juli

Wasserstoff fürs Handy

Wäre es nicht viel einfacher, einen Laptop wie ein Auto aufzutanken, statt nach einer Steckdose zu fahnden? Brennstoffzellen haben diesen Vorteil gegenüber Akkus, doch die Miniaturisierung hat ihre Tücken.

Schule des Volkes – die Pekingoper unter Mao

Offenheit und Wandlungsfähigkeit charakterisierten die chinesische Oper seit ihrer Entstehung im 13. Jahrhundert. Das stellte sie auch in den dunklen Jahren der Kulturrevolution unter Beweis.

